



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR - CCTA  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL - UACTA  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**JOSÉ JONAS SOARES DOS SANTOS**

**ANÁLISE DE RISCOS ESTRUTURAIS E AMBIENTAIS  
APLICADA A BARRAGEM DOS RESERVATÓRIOS  
COREMAS - MÃE D'ÁGUA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**Pombal**

**2024**

**JOSÉ JONAS SOARES DOS SANTOS**

**ANÁLISE DE RISCOS ESTRUTURAIS E AMBIENTAIS  
APLICADA A BARRAGEM DOS RESERVATÓRIOS  
COREMAS - MÃE D'ÁGUA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Campina Grande, Campus de Pombal/PB, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Cícero Fellipe Diniz de Santana

Pombal  
2024

S237a

Santos, José Jonas Soares dos.

Análise de riscos estruturais e ambientais aplicada a barragem dos reservatórios Coremas - Mãe d'água / José Jonas Soares dos Santos. – Pombal, 2024.

71 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, 2024.

“Orientação: Prof. Dr. Cícero Fellipe Diniz de Santana”.

Referências.

1. Barragens. 2. FMEA (Análise dos Modos de Falhas e Efeitos). 3. Análise de risco. 4. Segurança da barragem. 5. Manutenção preventiva. 6. Ações corretivas.. I. Santana, Cícero Fellipe Diniz de. II. Título.

CDU 627.82 (043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE TRABALHO DE  
CONCLUSÃO DE CURSO.

JOSÉ JONAS SOARES DOS SANTOS

**ANÁLISE DE RISCOS ESTRUTURAIS E AMBIENTAIS APLICADA A  
BARRAGEM DOS RESERVATÓRIOS COREMAS - MÃE D'ÁGUA**

Trabalho de Conclusão de Curso do discente JOSÉ JONAS SOARES  
DOS SANTOS **APROVADO** em 04 de junho de 2024 pela comissão  
examinadora composta pelos membros abaixo relacionados como requisito  
para obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL pela Universidade Federal de  
Campina Grande.

Registre-se e publique-se.

Documento assinado digitalmente  
 **CICERO FELLIPE DINIZ DE SANTANA**  
Data: 12/07/2024 19:51:34-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Cícero Fellipe Diniz de Santana  
(Orientador – UFCG)

Documento assinado digitalmente  
 **RODRIGO MENDES PATRÍCIO CHAGAS**  
Data: 10/07/2024 13:42:16-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me Rodrigo Mendes Patrício Chagas  
(Membro Interno – UFCG)

Documento assinado digitalmente  
 **VIRGINIA DA COSTA BRITO**  
Data: 08/07/2024 14:50:46-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Virgínia da Costa Brito  
(Membro Externo – UFCG)

**Dedicatória. . .**

Este trabalho é todo dedicado aos meus pais, pois é graças ao seu esforço que hoje posso concluir o meu curso.

A todas as minhas irmãs, que sempre me motivaram a concluir esse trabalho.

A Deus por sempre estar ao meu lado nos momentos mais difíceis desse trabalho.

Ao professor Cícero, pela sua paciência, conselhos e ensinamentos que foram essenciais para o desenvolvimento desse trabalho.

A minha família e amigos que estiveram sempre presentes direta ou indiretamente em todos os momentos de minha formação.

## **Agradecimentos**

Primeiramente, agradeço a Deus, por ter me concedido força, saúde e sabedoria para superar todos os desafios ao longo desta jornada acadêmica.

Agradeço de coração ao meu orientador, Cícero Fellipe, cuja orientação, paciência e conhecimento foram fundamentais para a realização deste trabalho. Sua confiança e apoio foram essenciais para que eu pudesse alcançar este objetivo.

A banca examinadora composta pelo professor Rodrigo Mendes Patrício Chagas e a professora Virgínia da Costa Brito, por aceitar o convite e fazer a avaliação deste trabalho tão importante para mim.

À minha mãe Helena Soares que com amor e dedicação esteve sempre ao meu lado, oferecendo apoio incondicional e encorajamento nos momentos mais difíceis. Ao meu pai, José Pereira por seu exemplo de perseverança e pela confiança depositada em mim, motivando-me a sempre buscar o melhor.

Às minhas irmãs, Josélia, Joseilda, Antônia, Josetânia e Joseane, por estarem sempre presentes, compartilhando alegrias e oferecendo palavras de incentivo nos momentos em que mais precisei.

A todos os meus professores da graduação, que compartilharam seu conhecimento e experiência, contribuindo significativamente para a minha formação acadêmica e pessoal.

Aos meus sobrinhos e sobrinhas, por iluminarem meus dias com suas inocentes alegrias e por serem uma fonte constante de inspiração.

A Fabricya, que esteve comigo em toda minha graduação e me deu forças para concluir mais essa etapa da minha vida.

A meu amigo/irmão Joaquim Júnior por sempre estar presente em minha vida, me dando apoio e conselhos que me ajudaram muito nesse trabalho.

Aos meus colegas ao longo do curso, que tornaram essa caminhada mais leve e enriquecedora. Juntos, compartilhamos aprendizados, desafios e conquistas que levarei para toda a vida.

E, finalmente, aos meus colegas, Klinsman, Vinicius, Daniel, Elivelton, Will, Bruno, Jerfeson, Felipe, Deys, Jonathan e outros. Que moraram junto comigo, pela convivência harmoniosa e pelas experiências compartilhadas, fundamentais para o meu desenvolvimento e crescimento durante esses anos.

“Tudo tem o seu tempo determinado, e há tempo  
para todo o propósito debaixo do céu“. – Eclesiastes  
3:1.

## Resumo

As barragens são construções de engenharia empregadas desde tempos antigos para múltiplas finalidades, incluindo a regulação de rios, o controle de inundações, o armazenamento de água e a produção de energia. Com o passar dos séculos, elas se espalharam por todo o mundo, desempenhando um papel essencial no progresso das sociedades. No Nordeste do Brasil, seu papel principal é o combate às secas, armazenando água para uso futuro. Dada sua importância, é crucial realizar uma análise de risco estrutural e ambiental, como foi feito para a barragem dos reservatórios Coremas - Mãe d'água, utilizando o método de Análise dos Modos de Falhas e Efeitos (FMEA). A análise considera diferentes modos de falha para identificar os riscos potenciais da barragem, utilizando critérios de severidade, ocorrência, detecção e abrangência. Com os resultados, é possível classificar de maneira qualitativa e quantitativa as principais áreas que necessitam de monitoramento contínuo e manutenção preventiva. Isso direciona as ações corretivas para os locais necessários, garantindo a segurança da barragem e protegendo as comunidades vizinhas e o meio ambiente.

**Palavras-chave:** Barragens, FMEA (Análise dos Modos de Falhas e Efeitos), Análise de risco, segurança da barragem, manutenção preventiva, ações corretivas.

## Abstract

Dams are engineering constructions used since ancient times for multiple purposes, including river regulation, flood control, water storage, and energy production. Over the centuries, they have spread worldwide, playing an essential role in the progress of societies. In the Northeast of Brazil, their primary role is to combat droughts by storing water for future use. Given its importance, it is crucial to perform a structural and environmental risk analysis, as was done for the *Coremas - Mãe d'água* reservoirs dam, using the Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) method. The analysis considers different failure modes to identify potential risks to the dam, using criteria such as severity, occurrence, detection, and scope. The results allow for the qualitative and quantitative classification of the main areas requiring continuous monitoring and preventive maintenance. This directs corrective actions to the necessary locations, ensuring the safety of the dam and protecting nearby communities and the environment.

**Keywords:** Dams, FMEA (Failure Modes and Effects Analysis), Risk analysis, Dam safety, Preventive maintenance, Corrective actions.

## Lista de ilustrações

Figura 1 – Barragem Sadd El Kafara – Jordânia - Construída a cerca de 4600 .....	18
Figura 2 – Barragem de Sadd El Kafara.....	19
Figura 3 – Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH). .....	20
Figura 4 – Estrutura de Gerenciamento de Risco de Emergência para Barragens de Deslizamento de Terra em Bacia Hidrográfica .....	22
Figura 5 – Uma estrutura hierárquica de falha da barragem do reservatório sob cargas de explosão.....	23
Figura 6 – Sistema Integrado de Segurança de Barragens.....	27
Figura 7 – Registro de volume de água açude Coremas nos últimos 8 anos.....	29
Figura 8 – Registro de volume de água açude Mãe D’água nos últimos 8 anos .....	29
Figura 9 – Localização dos reservatórios do sistema Coremas - Mãe D’Água .....	30
Figura 10 – Placa de concreto na montante do açude Estevam Marinho.....	31
Figura 11 – Construção de uma nova calçada destinada a pedestres .....	32
Figura 12 – Trecho da barragem em fase de construção da calçada .....	33
Figura 13 – Condição do setor montante da barragem no momento da pesquisa .....	33
Figura 14 – Climatologia - AESA .....	34
Figura 15 – Visão à montante da barragem .....	35
Figura 16 – Imagem de satélite da barragem do açude Estevam Marinho localizada em Coremas - PB.....	36
Figura 17 – Fluxograma metodológico.....	37
Figura 18 – Sarjetas com obstruções no momento do estudo.....	51
Figura 19 – Quantitativo do número de falhas por trecho .....	68
Figura 20 – Trincas e rachaduras com alta presença de vegetação e desgastes das juntas de concreto no trecho 100 metros .....	69
Figura 21 – Sarjeta obstruída completamente no trecho de 120 metros .....	70
Figura 22 – Presença de trincas e rachaduras com baixa vegetação e desgaste parcial da junta de concreto no trecho de 280 metros.....	71
Figura 23 – Presença de rachadura com baixa vegetação e desgaste completo da junta de concreto no trecho de 300 metros .....	72
Figura 24 – Alta presença de vegetação com desgaste da junta de concreto e rachaduras presentes no trecho de 440 metros .....	73
Figura 25 – Trincas e desgaste parcial da junta de concreto no trecho de 560 metros.....	74

## **Lista de quadros**

Quadro 1 – Avaliação da severidade dos modos de falha.....	46
Quadro 2 – Avaliação da ocorrência dos modos de falha.....	47
Quadro 3 – Avaliação da detecção dos modos de falha.....	48
Quadro 4 – Avaliação da abrangência dos modos de falha.....	49
Quadro 5 – Cálculo nível de risco potencial (NRP) aplicado aos modos de falhas.....	50

## Lista de gráficos

Gráfico 1 – Gráfico da avaliação da severidade nos modos de falha .....	52
Gráfico 2 – Gráfico da avaliação da ocorrência nos modos de falha .....	53
Gráfico 3 – Gráfico da avaliação da detecção nos modos de falha .....	53
Gráfico 4 – Gráfico da avaliação da abrangência nos modos de falha.....	54
Gráfico 5 – Gráfico da avaliação de acordo com NRP médio aplicado aos modos de falhas	55
Gráfico 6 – Gráfico quantitativo da presença de trincas no concreto do talude .....	56
Gráfico 7 – Gráfico quantitativo da presença de rachadura no concreto do talude .....	57
Gráfico 8 – Gráfico quantitativo da presença de desgaste parcial nas juntas das placas de concreto.....	58
Gráfico 9 – Gráfico quantitativo da presença de desgaste completo nas juntas das placas de concreto .....	59
Gráfico 10 – Gráfico quantitativo da obstrução parcial das sarjetas .....	60
Gráfico 11 – Gráfico quantitativo da obstrução completa das sarjetas .....	61
Gráfico 12 – Gráfico quantitativo da baixa presença de vegetação entre as trincas e rachaduras da montante .....	62
Gráfico 13 – Gráfico quantitativo da alta presença de vegetação entre as trincas e rachadu- ras da montante .....	63

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Temperaturas médias mensais e anual observada no posto de Coremas . . .	34
Tabela 2 – Severidade .....	39
Tabela 3 – Ocorrência .....	40
Tabela 4 – Detecção .....	41
Tabela 5 – Abrangência .....	42
Tabela 6 – Modo de falha e falhas da barragem em estudo .....	45

## Lista de abreviaturas e siglas

A	Abrangência
AESA	Agência Executiva de Gestão das Águas
ANA	Agência Nacional de Águas.
APPCC	Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle
APR	Análise Preliminar de Risco
CERH	Conselhos Estaduais de Recursos Hídricos
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
D	Deteção
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
ETA	Estação de Tratamento de Águas
FAHP	Fuzzy Analytic Hierarchy Process
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis
FTA	Atos ameaçadores da face (face threatening act)
G - E	Gestão de Riscos - Emergência
HACCP	Hazard Analysis and Critical Control Point
HAZOP	Hazard and Operability Study (Estudo de Perigos e Operabilidade)
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
M - V	Monitoramento – Vigilância
MDH	Ministério do Desenvolvimento Regional
NRP	Nível de Risco Potencial
O	Ocorrência
S	Severidade
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SNSH	Secretaria Nacional de Segurança Hídrica
T-O	Técnico - Operacional
mm	Milímetros

## Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>16</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>17</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>Revisão bibliográfica .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1</b>	<b>Construção e gestão de barragens.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2</b>	<b>Estudos de riscos em barragens .....</b>	<b>21</b>
<b>2.3</b>	<b>Gestão e análise de risco na engenharia .....</b>	<b>24</b>
<b>2.4</b>	<b>FMEA - Failure Mode and Effects Analysis (Análise dos modos de falhas e efeitos).....</b>	<b>25</b>
<b>2.5</b>	<b>Análise e avaliação de risco em barragens.....</b>	<b>26</b>
<b>2.6</b>	<b>Reservatórios Coremas - Mãe d'água .....</b>	<b>28</b>
<b>3</b>	<b>Materiais e métodos .....</b>	<b>30</b>
<b>3.1</b>	<b>Objeto de estudo .....</b>	<b>30</b>
<b>3.1.1</b>	Aspectos estruturais e ambientais do objeto de estudo .....	31
<b>3.2</b>	<b>Métodos.....</b>	<b>36</b>
<b>3.3</b>	<b>Coleta de dados.....</b>	<b>38</b>
<b>3.4</b>	<b>Níveis de classificação e risco potencial .....</b>	<b>38</b>
<b>3.4.1</b>	Severidade .....	39
<b>3.4.2</b>	Ocorrência.....	40
<b>3.4.3</b>	Detecção.....	41
<b>3.4.4</b>	Abrangência .....	42
<b>3.5</b>	<b>Organização e análise de dados .....</b>	<b>43</b>
<b>4</b>	<b>Resultados e Discussões.....</b>	<b>45</b>
<b>4.1</b>	<b>Método da análise FMEA .....</b>	<b>45</b>
<b>4.2</b>	<b>Avaliação da severidade aplicada aos modos de falha .....</b>	<b>45</b>
<b>4.3</b>	<b>Avaliação da ocorrência aplicada aos modos de falha .....</b>	<b>47</b>
<b>4.4</b>	<b>Avaliação da detecção aplicada aos modos de falha.....</b>	<b>48</b>
<b>4.5</b>	<b>Avaliação da Abrangência aplicada aos modos de falha .....</b>	<b>49</b>
<b>4.6</b>	<b>Avaliação geral dos modos de falhas e cálculo do nível de risco potencial (NRP).....</b>	<b>50</b>
<b>4.7</b>	<b>Gráficos.....</b>	<b>52</b>
<b>5</b>	<b>Conclusão.....</b>	<b>64</b>
	<b>Referências.....</b>	<b>65</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>67</b>

## 1 Introdução

As barragens são estruturas multifuncionais utilizadas para diversos propósitos, como geração de energia, regularização de rios, controle de enchentes e armazenamento de água. Devido à sua versatilidade, essas construções são comuns em todo o mundo. No nordeste do Brasil, as barragens desempenham um papel crucial no combate aos efeitos das secas, acumulando grandes volumes de água para uso posterior (FONTENELLE *et al.*, 2018).

Historicamente, as barragens eram construídas com duas paredes de alvenaria de pedra, uma, a montante e outra a jusante, com o espaço entre elas preenchido com argila compactada e, ocasionalmente, blocos de pedra. Com o advento do cimento Portland, produzido por Isaac Johnson em 1845, o concreto passou a ser utilizado tanto para o preenchimento do núcleo das barragens de alvenaria quanto para a construção de suas paredes e o interior das barragens de terra (ARAUJO, 1995).

No entanto, apesar dos avanços na construção de barragens, existem diversos casos de rompimentos de barragens que resultaram em grandes prejuízos, tanto para indivíduos quanto para a sociedade. Esses incidentes podem ocorrer em estruturas simples, usadas por pequenos proprietários de terra, até barragens de rejeitos de mineração. Um exemplo notório é o rompimento da barragem de uma mineradora no Rio Fubá, subafluente do Rio Paraíba do Sul, em Minas Gerais, ocorrido em janeiro de 2007 (COLLE, 2008).

Os rompimentos de barragens podem ser provocados por uma combinação de fatores, incluindo falhas estruturais relacionadas a problemas de projeto, construção ou manutenção inadequada. A erosão interna (*piping*), condições meteorológicas extremas, eventos sísmicos e a degradação dos materiais ao longo do tempo também são fatores significativos que contribuem para a vulnerabilidade das barragens. Além disso, erros operacionais e a falta de monitoramento e manutenção adequada são fatores humanos cruciais que podem levar ao colapso.

Este estudo realiza uma avaliação abrangente dos riscos estruturais e ambientais para a barragem dos reservatórios Coremas - Mãe D'água. Identificam-se os principais riscos e pontos críticos ao longo da barragem, analisando-se as condições da estrutura e os fatores ambientais que podem influenciar sua integridade. A análise detalha as principais causas dos riscos, como falhas de construção, desgaste natural, mudanças climáticas e atividades humanas, além das potenciais consequências, incluindo rupturas, infiltrações e impactos ambientais significativos.

O estudo também destaca os riscos que necessitam de maiores cuidados, apontando áreas que exigem monitoramento constante e intervenções preventivas. Propõem-se estratégias preventivas, como a implementação de sistemas de monitoramento avançados, a realização de manutenções regulares, a adoção de técnicas de engenharia voltadas para melhorias na barragem e a promoção de ações de conscientização ambiental junto à comunidade local.

Assim, este trabalho oferece um quadro detalhado e prático para a gestão de riscos, visando garantir a segurança e a sustentabilidade da barragem dos reservatórios Coremas - Mãe D'água.

## **1.1 Objetivo geral**

Identificar e analisar os riscos estruturais e ambientais da barragem do sistema de reservatórios Coremas - Mãe d'Água utilizando a técnica de Análise dos Modos de Falhas e Efeitos.

## **1.2 Objetivos específicos**

- Identificar os principais riscos e pontos críticos de controle sobre os aspectos estruturais e ambientais da barragem do sistema de reservatórios estudado;
- Avaliar sistematicamente, através das técnicas de análise de risco aplicadas, as principais causas e consequências dos riscos identificados;
- Analisar e ranquear quali-quantitativamente os riscos do sistema em estudo, conforme os níveis de classificação das falhas e do potencial de perigo.

## 2 Revisão bibliográfica

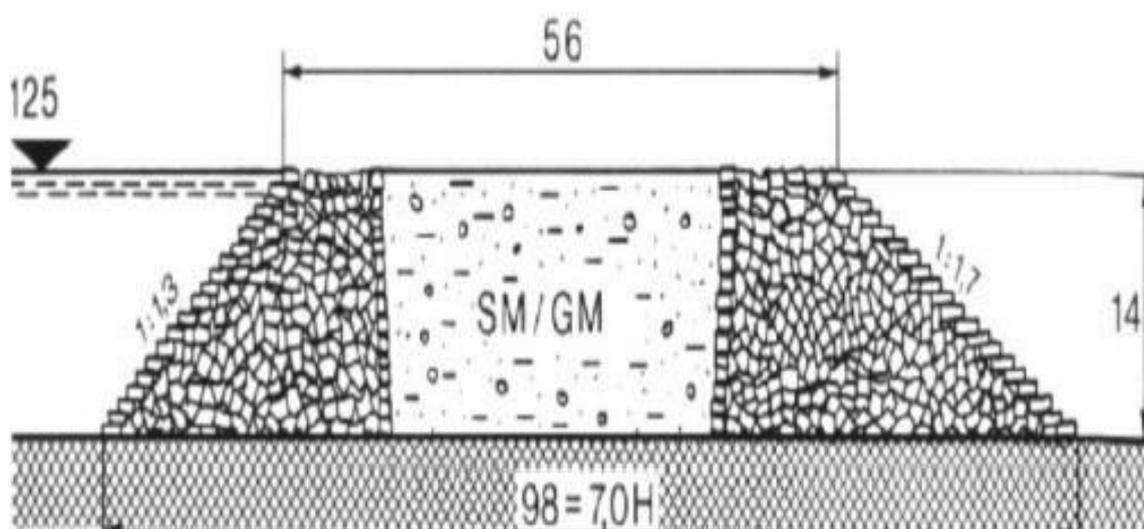
### 2.1 Construção e gestão de barragens

Uma barragem é caracterizada como uma construção presente em um curso permanente ou temporário, destinada a reter ou armazenar líquidos, ou misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas (SILVA; SILVA, 2020). No entanto, a construção e o funcionamento das barragens podem acarretar potenciais prejuízos para as comunidades e para os recursos naturais e materiais presentes na área circundante.

As barragens de Jawa, situadas na Jordânia, são as estruturas de contenção mais antigas registradas. Construídas há aproximadamente 5.600 anos, a 100 km a nordeste de Amã, esse conjunto de cinco pequenas represas de armazenamento era uma parte essencial de um sistema de fornecimento de água que incluía canais e outras estruturas de desvio, projetado para abastecer a cidade de Jawa (LEITE, 2019).

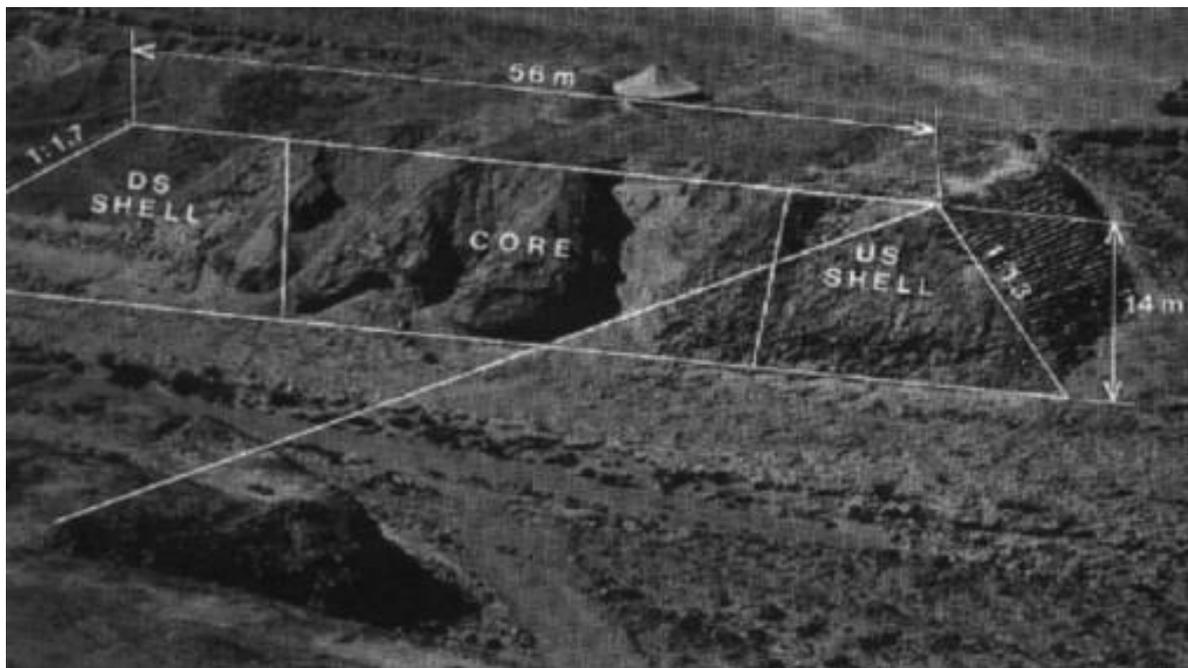
Assim como as primeiras construções, também existem registros dos primeiros acidentes e incidentes relacionados a barragens. Encontrada em 1885, a Barragem Sadd El-Kafara na Jordânia, foi erguida aproximadamente há 4600 anos. Essa barragem possui diques construídos com pedras, assim como as pirâmides, e provavelmente sofreu um rompimento por transbordamento (quando a água ultrapassa a crista da barragem). Ao observar sua seção transversal (Figura 1), podem ser notadas semelhanças com uma represa moderna de enrocamento. Na Figura 2 são apresentados os detalhes construtivos dessa barragem (SANTOS, 2018).

**Figura 1 – Barragem Sadd El Kafara – Jordânia - Construída a cerca de 4600.**



Fonte: Santos, 2018.

**Figura 2 – Barragem de Sadd El Kafara.**



Fonte: Santos, 2018.

A água representa um recurso escasso da natureza, com importância econômica e vital para a sobrevivência de todas as formas de vida. Como um recurso de propriedade coletiva, cabe ao governo federal e aos governos estaduais e do Distrito Federal supervisionar o seu uso e estabelecer uma variedade de medidas de administração, visando incentivar a utilização responsável e sustentável, visando o bem-estar das gerações presentes e futuras (ANA, 2021).

A gestão dos recursos hídricos no Brasil é regulamentada pela Lei nº 9.433/1997, conhecida como a Política Nacional de Recursos Hídricos. Esta legislação abrange conceitos, princípios, orientações, ferramentas de gestão e a estrutura de governança estabelecida pela (ANA, 2021). Os objetivos fundamentais dessa política são os seguintes:

- Garantir que as gerações atuais e futuras tenham acesso à quantidade necessária de água com padrões de qualidade adequados para os diferentes usos;
- Promover o uso racional e coordenado dos recursos hídricos, incluindo o transporte aquaviário, visando ao desenvolvimento sustentável;
- Prevenir e proteger contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou causados pelo uso inadequado dos recursos naturais.

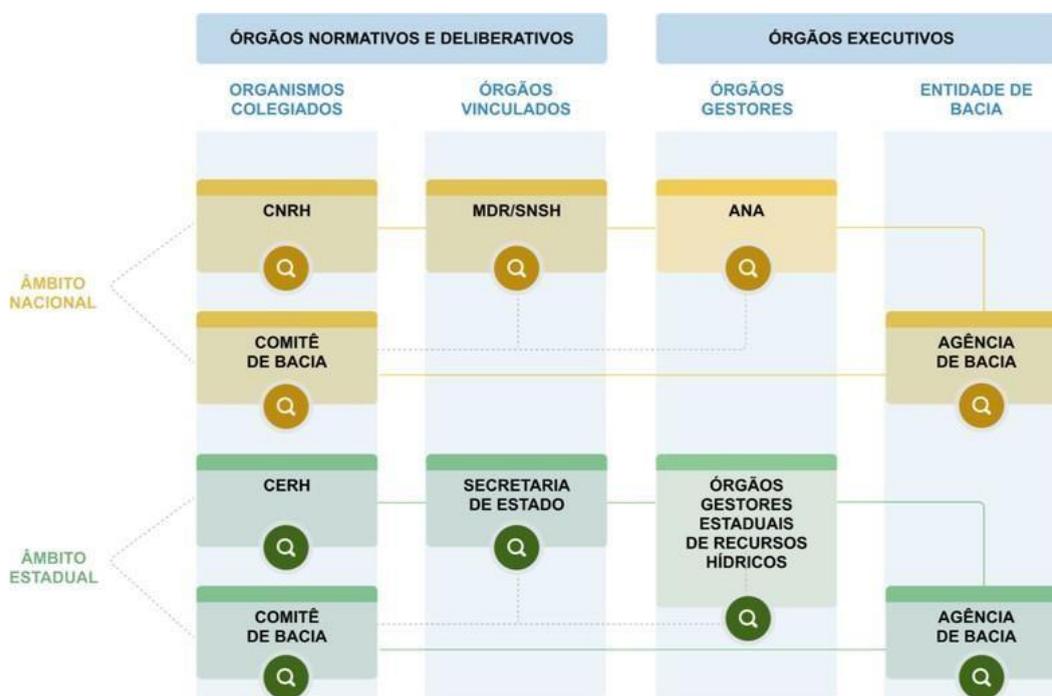
Segundo a ANA (2021), O Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH) é a estrutura estabelecida no Brasil para administrar os recursos hídricos. Ele é composto por diversos órgãos colegiados, que discutem e tomam decisões sobre a gestão desses recursos (atuando como consultivos e deliberativos), bem como por órgãos administrativos

encarregados de executar a Política Nacional de Recursos Hídricos. Esses órgãos podem operar ao nível federal ou estadual, dependendo da jurisdição das fontes de água. O SINGREH inclui os seguintes componentes:

- Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH);
- Secretaria Nacional de Segurança Hídrica (SNSH);
- Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR);
- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA);
- Conselhos Estaduais de Recursos Hídricos (CERH).

Assim como, aos órgãos gestores estaduais de recursos hídricos, pelos comitês de bacia hidrográfica (interestaduais e estaduais) e pelas agências de água (vinculadas aos comitês) como mostra a figura 3:

**Figura 3 – Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH).**



Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2021.

No estado da Paraíba, a entidade responsável pela gestão dos recursos hídricos é a Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba, conhecida como AESA, estabelecida por meio da Lei nº 7.779, datada de 07/07/2005. Conforme estabelecido no Art. 3º da mencionada lei,

os objetivos da Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA) incluem o gerenciamento dos seguintes recursos hídricos (AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS DO ESTADO DA PARAÍBA (AESA), 2023):

- Recursos hídricos subterrâneos e superficiais localizados dentro do território do Estado da Paraíba;
- Recursos hídricos provenientes de bacias hidrográficas localizadas em outros Estados, desde que sejam transferidos para a jurisdição da Paraíba por meio de obras implementadas pelo Governo Federal;
- Recursos hídricos de domínio da União que ocorrem em território do Estado da Paraíba, por meio de delegação conforme estabelecido por lei.

## 2.2 Estudos de riscos em barragens

Em escala global, estão em curso diversas pesquisas que buscam reduzir os riscos associados às barragens. Isso envolve a análise da integridade da estrutura das barragens, visando evitar tanto problemas como inundações quanto possíveis falhas na própria estrutura do reservatório, que poderiam comprometer suas funcionalidades originais e características.

Existem diversos estudos em andamento, como o realizado por He *et al.* (2022), que analisou a gestão de riscos emergenciais para rupturas de barragens de deslizamento de terra relacionadas ao rio Yangtze em 2018. Nesse trabalho, a metodologia empregada começa com a implementação de um sistema de monitoramento e mapeamento de um modelo de falha baseado em erosão por transbordamento. Em seguida, são conduzidas análises de inundação em toda a bacia do rio Yangtze e análises detalhadas dos riscos de inundação considerando medidas de mitigação desses riscos. Isso visa facilitar uma futura tomada de decisões quanto aos riscos emergenciais.

O estudo de He *et al.* (2022), evidencia a aplicação de uma análise de risco abrangendo a cadeia de eventos perigosos, com a implementação de várias medidas de mitigação ao longo do rio (conforme ilustrado na figura 4). Os resultados obtidos a partir dessa análise desempenharam um papel essencial ao orientar as ações relacionadas a várias estratégias de redução de riscos. O principal objetivo dessas medidas é minimizar os efeitos adversos e garantir a segurança frente a possíveis eventos perigosos.

**Figura 4 – Estrutura de Gerenciamento de Risco de Emergência para Barragens de Deslizamento de Terra em Bacia Hidrográfica.**



Fonte: Adaptado de He et al., 2022.

A pesquisa concluiu que a estratégia de análise de risco da cadeia de eventos perigosos, aplicada à grande barragem de deslizamento de terra no rio Yangtze em 2018, conseguiu prever com alto grau de confiabilidade as inundações que resultariam da ruptura da barragem, bem como o trajeto dessas inundações até a área afetada. Com base nessa conclusão, o estudo sugere que a construção de um canal de 15 metros de profundidade na crista da barragem de deslizamento de terra poderia reduzir em 40% a magnitude das inundações resultantes. Além disso, a remoção de algumas barragens a jusante, a evacuação de pelo menos 54.842 pessoas e a regulamentação por meio de pelo menos três reservatórios demonstraram ser medidas eficazes de mitigação de riscos, conforme destacado no estudo.

Li *et al.* (2023) conduziu um estudo que aborda a questão da segurança das barragens de reservatórios, com foco especial nos perigos associados a cargas explosivas. O artigo descreve um método para identificar os diferentes cenários de falhas que podem ocorrer em barragens de reservatórios quando sujeitas a explosões, para prevenir danos materiais significativos, minimizar os impactos ambientais e reduzir os riscos para a vida humana.

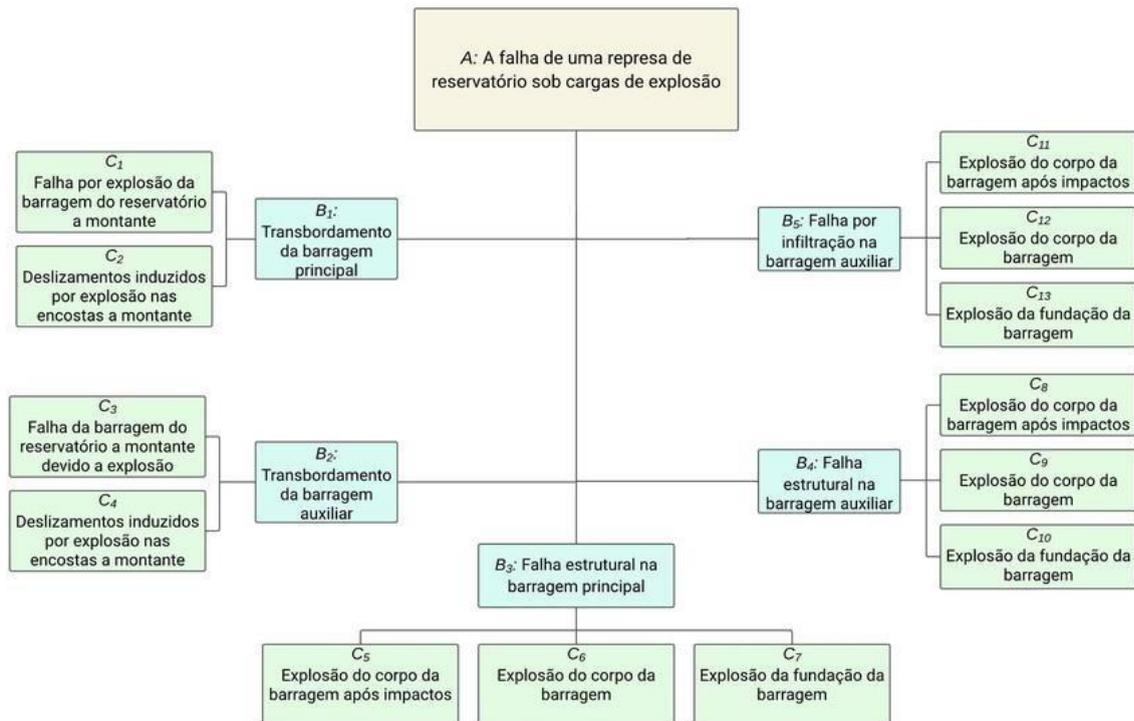
A metodologia empregada no estudo começa com uma análise das características de resistência a explosões e falhas em diversos tipos de barragens, como barragens de terra-rocha, barragens de concreto por gravidade e barragens de arco de concreto, utilizando simulações numéricas. Em seguida, com base nos resultados dessas simulações e nas estruturas reais das

barragens e construções associadas, são identificados os potenciais modos e trajetos de falha que podem surgir quando essas barragens são submetidas a cargas explosivas.

O método de identificação dos principais modos e caminhos de falha proposto por Li *et al.* (2023) no estudo emprega o processo de hierarquia analítica difusa (FAHP). Isso implica a criação de estruturas hierárquicas de falha para avaliar e priorizar os riscos associados a cada modo de falha identificado. No âmbito do estudo, foram analisadas as características anti-explosão e os modos de falha típicos de barragens de terra-rocha, barragens de concreto por gravidade e barragens de arco de concreto convencionais.

Foi conduzido um estudo de caso para aplicar o método, utilizando de barragens auxiliares e considerando a hipótese de uma grande barragem de reservatório ser danificada por uma quantidade específica de explosivos. Os principais modos e caminhos de falha associados a essa barragem de reservatório sob cargas explosivas foram identificados. Na prática, as maiores perdas são atribuídas à falha da própria barragem do reservatório. O objetivo principal do dano causado pela explosão é induzir a falha da barragem. Portanto, a estrutura hierárquica de falha da barragem de reservatório sob cargas explosivas foi elaborada com base nas perspectivas de falha tanto da barragem principal quanto das estruturas auxiliares mostrado na figura 5 (LI *et al.*, 2023).

**Figura 5 – Uma estrutura hierárquica de falha da barragem do reservatório sob cargas de explosão.**



Fonte: Adaptado de LI *et al.*, 2023.

Li *et al.* (2023) conclui que os estudos de caso evidenciam que o método sugerido é eficiente na identificação dos principais modos e trajetos de falha em barragens de reservatórios sujeitas a cargas explosivas. Isso pode fornecer uma base científica sólida e apoio técnico para a análise de riscos e a implementação de medidas de segurança em barragens de reservatórios diante desse tipo específico de ameaça.

Os diversos estudos apresentados demonstram que as estruturas de barragens podem ser analisadas de várias maneiras. Isso pode envolver a análise dos modos e trajetos de falhas em barragens sujeitas a cargas explosivas, bem como a gestão de riscos em situações emergenciais relacionadas a rupturas de barragens de deslizamento de terra. Ambos os autores conseguem efetivamente encontrar soluções para os problemas abordados em seus estudos, indicando que essas abordagens podem ser aplicadas com eficácia em diferentes barragens em todo o mundo.

Da mesma forma, o estudo conduzido neste trabalho destaca que uma análise de risco preliminar, utilizando métodos convencionais de análise de risco, pode ser valiosa para avaliar a integridade das estruturas de barragens. Alguns exemplos desses métodos incluem a FMEA (Análise dos Modos de Falha e Efeitos), HAZOP (Estudos de Perigo e Operabilidade), APR (Análise Preliminar de Riscos) e outros métodos similares.

### **2.3 Gestão e análise de risco na engenharia**

Atualmente, diversos métodos e mecanismos são utilizados para a análise de riscos na engenharia em geral. Cada um desses métodos tem suas próprias vantagens e características específicas. Assim, exploraremos alguns dos métodos mais comuns e amplamente adotados nesse campo.

E dentre esses métodos, podemos listar os principais:

- FMEA - Failure Modes and Effects Analysis (Análise dos modos de falhas e efeitos);
- HAZOP - Hazard and Operability Studies (Estudos de perigo e operabilidade);
- APR - Análise Preliminar de Riscos;
- FTA - Fault Tree Analysis (Análise árvore de falhas)
- ETA - Event Tree Analysis (Árvore de Eventos)
- HACCP - Hazard Analysis and Critical Control Point (Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle - APPCC)

O método FMEA analisa sistemas de forma indutiva, identificando funções e possíveis falhas de cada componente, avaliando os efeitos no comportamento geral. Esses procedimentos incluem identificar objeto, funções, falhas potenciais, efeitos, causas, mecanismos de controle, ações recomendadas e prioridades. Além dos elementos estruturais, considera aqueles que

impactam ou são impactados pela perda de funcionalidade (SANTOS; CALDEIRA; SERRA, 2006).

HAZOP baseia-se na análise sistemática de fluxogramas de processo e instrumentação, permitindo a análise de cada seção do projeto e a identificação de medidas para minimizar ou eliminar os riscos identificados (SELLA, 2014).

A APR é geralmente a primeira técnica utilizada em análises de risco durante a fase de concepção de projetos, especialmente em projetos de inovação tecnológica com poucas informações disponíveis sobre os riscos envolvidos. Seu objetivo é mitigar riscos e minimizar custos além do planejado (SELLA, 2014).

A FTA é usada para analisar as causas de riscos, utilizando uma representação gráfica de combinações de falhas que podem levar a um efeito. Esse método é uma análise qualitativa, mas se as probabilidades individuais forem conhecidas, a probabilidade do caminho crítico pode ser quantificada. Cada nó intermediário assume um papel de causa/efeito, enquanto o nó inicial representa a falha (efeito) e os nós finais representam a causa (YAMANE; SOUZA, 2007).

A Árvore de Eventos destaca-se como uma ferramenta de análise de risco, fornecendo entendimento por meio de representação gráfica. Pode ser usada para avaliar a confiabilidade do sistema e estimar probabilidades de ocorrência de eventos. Suas vantagens incluem detalhamento de projeto, representação gráfica, identificação de sequências de eventos e consideração de especialistas (ESPÓSITO *et al.*, 2010).

O sistema HACCP segue sete princípios básicos, incluindo análise de perigos, identificação de pontos críticos de controle, estabelecimento de limites críticos, monitoramento, ações corretivas, verificação e controle de registros. O HACCP pode ser aplicado para o abastecimento de água potável, identificando perigos microbiológicos e estabelecendo pontos críticos de controle (SOUSA, 2008).

#### **2.4 FMEA - Failure Mode and Effects Analysis (Análise dos modos de falhas e efeitos)**

A análise dos modos de falhas e efeitos - FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) é uma forma de análise de confiabilidade, usada para o mapeamento das consequências de eventos específicos que podem ocorrer durante a operação de um sistema de engenharia, feito para identificar e priorizar as ações necessárias (HARTFORD; BAECHER, 2004).

Método originalmente desenvolvido em 1949 pelos militares dos Estados Unidos para ajudar a analisar os modos de falha presentes em diferentes etapas do processo e identificar seus efeitos na segurança e confiabilidade do sistema analisado. Desde o seu desenvolvimento, a ferramenta tem sido aplicada na fase de análise de riscos e modos de falha em diversas indústrias, com destaque para aeroespacial, química, petróleo, nuclear e automotiva e também já utiliza aplicações práticas relacionadas as barragens (DOMINGUES, 2008).

Modo de falha está relacionado ao fato de como um processo pode ser levado a operar de maneira deficiente sendo composto por três elementos: efeito, causa e detecção. Efeito é

a consequência que a falha pode causar ao cliente; causa é o que indica a razão da falha ter ocorrido e detecção é a forma utilizada no controle do processo para evitar as falhas potenciais. O FMEA tem por objetivo identificar, delimitar e descrever as não conformidades geradas pelo processo e seus efeitos e causas, para por ações de prevenção poder diminuí-los ou eliminá-los (RODRIGUES, 2004).

A técnica foi desenvolvida originalmente para projetos, mas encontrou aplicações na análise do potencial de falha de sistemas existentes. Seu uso não fica restrito a sistemas de engenharia e já vem sendo aplicado em diversas áreas de atividades sociais, sendo a saúde um exemplo (HARTFORD; BAECHER, 2004).

Ainda segundo Hartford e Baecher (2004), o processo de análise de risco geralmente envolve as etapas de definição de escopo e seleção do método de análise, definição e identificação das condições de perigo, estimativa da probabilidade de falha da barragem e consequência, estimativa do risco, documentação, verificação e atualização da análise.

A eficácia do processo FMEA depende da experiência aplicada na análise da falha, uma boa equipe a frente do processo com análises detalhadas dos elementos relacionados a construção, ao projeto e a operação do sistema imprescindíveis para uma ótima resposta da aplicação.

Aplicando-se o uso da ferramenta, o método do FMEA adota uma estrutura padrão e perfeitamente definida que contempla algumas etapas apresentadas abaixo.

- Estruturação do sistema;
- Definição das funções de cada componente do sistema;
- Identificação dos modos potenciais de ruptura associados a cada função de cada componente;
- Identificação das causas potenciais;
- Descrição dos efeitos diretos, nas demais componentes e no sistema;
- Levantamento das medidas disponíveis para detecção dos modos de ruptura ou das suas causas e controles ou mitigação dos seus efeitos.

## **2.5 Análise e avaliação de risco em barragens**

De acordo com Leite (2019, p.31): “A análise de riscos se baseia no uso da informação disponível para estimar o risco relativo a indivíduos ou populações, a propriedades ou ambientes, decorrentes de condições de perigo. Ela envolve a desagregação ou decomposição do sistema da barragem e fontes de riscos nas suas partes fundamentais.”

O risco é um processo sistemático e organizado de avaliação dos possíveis riscos associados a uma determinada atividade, projeto, processo ou operação. A quantificação desse

processo é fundamental para ajudar a identificar e gerenciar potenciais riscos que possam afetar negativamente seus objetivos, metas e operações. (VIANNA, 2015)

A análise de risco pode ser aplicada em diversas áreas, por exemplo, nas engenharias, saúde e segurança ocupacional, meio ambiente, segurança de informações, finanças, entre outras. É um processo contínuo e dinâmico que deve ser revisado e atualizado regularmente para garantir que os riscos sejam continuamente identificados e gerenciados de forma adequada.

Segundo (LEITE, 2019), um dos elementos que tornam a engenharia de barragens uma ciência com certas dificuldades são as incertezas decorrentes das limitações de modelagem e compreensão da apresentação física de barragens que ocorrem nas diversas fases de projeto, construção e operação da estrutura.

“Tanto as análises qualitativas quanto as quantitativas, de aplicações recentes em barragens, apresentam limitações importantes. Enquanto as qualitativas tendem a ser subjetivas, as quantitativas ainda se apresentam de aplicação restrita na área de barragens em virtude da dificuldade na caracterização analítica das incertezas envolvidas no processo. Completa-se que, na engenharia geotécnica, nenhuma das duas abordagens pode ser considerada totalmente adequada, pois não conseguem modelar a realidade por completo.” (VIANNA, 2015, P. 32).

Um dos conceitos considerado o mais completo para o controle da segurança de barragens é o chamado Sistema de Integrado de Segurança (PERINI, 2009), que aplica a questão sobre três pilares:

- Técnico-Operacional (T-O);
- Monitoramento- Vigilância (M-V);
- Gestão de Riscos / Emergência (G-E).

Os pilares mostrados conforme a Figura 6 devem ser compreendidos como um apoio que, em conjunto, mantém a barragem segura em diversas fases de vida.

**Figura 6 – Sistema Integrado de Segurança de Barragens**



Os primeiros componentes do Sistema Integrado de Segurança fazem parte das medidas tradicionais do sistema de segurança, sendo o Técnico-Operacional(T-O) responsável pelo controle da segurança estrutural, hidráulica e operacional, aplicadas nas fases de projeto, construção, operação e descomissionamento, de acordo com critérios e normas técnicas vigentes; o Monitoramento-Vigilância(M-V) compreende às medidas de observação ou monitoramento, estrutural e hidráulico, assim como as medidas especiais de vigilância, com os sistemas de inspeção, detecção e análise da obra. Por fim, a Gestão de Riscos / Emergência(G-E) compreende a implementação e preparação de todas as medidas e procedimentos necessários para o controle dos riscos e para dar uma resposta aos eventuais acidentes que possa ocorrer numa barragem (PERINI, 2009).

Os três pilares desempenham uma grande importância na segurança de barragens, mas devem ser encarados por profissionais como um complemento as análises feitas. Cada pilar, portanto, deve ser compreendido como uma condição necessária para segurança, mas não o suficiente para conclusão do problema.

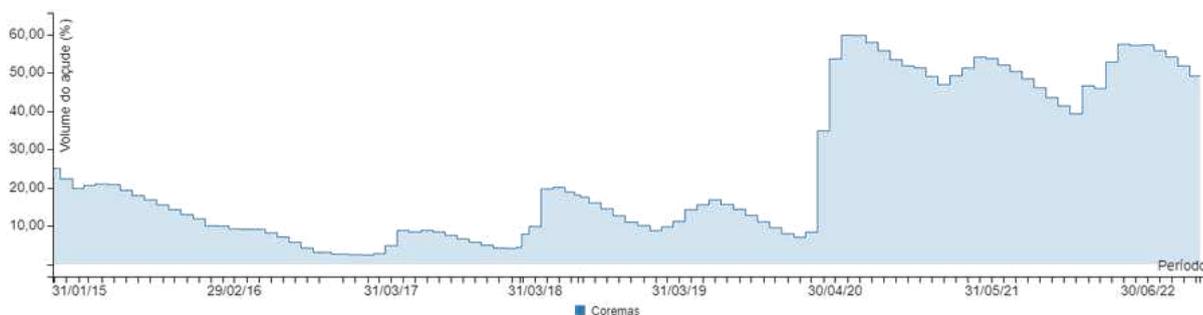
## **2.6 Reservatórios Coremas - Mãe d'água**

Com sua construção executada pelo DNOCS (Departamento Nacional de Obras Contra as Secas) entre os anos de 1937 e 1942, os reservatórios Coremas e Mãe D'água foram construídos segundo LIMA (2004), com as finalidades de: perenização dos vales, controle de cheias, irrigação, piscicultura, aproveitamento de culturas nas áreas de montante, abastecimento de água para as populações urbanas e geração de energia.

Esses dois reservatórios são tão próximos que formam um único espelho d'água ao longo do vertedouro de 237 metros, com capacidade máxima de troca de água de 12 m<sup>3</sup>/s. Esse sistema Coremas - Mãe D'água tem em sua capacidade máxima 1.358.000.000 m<sup>3</sup> de água, mas atualmente possui apenas 634.629.631 m<sup>3</sup>, ou seja, está com 46,73% da capacidade máxima, segundo os dados de monitoramento da AESA - Agencia Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba, (2022).

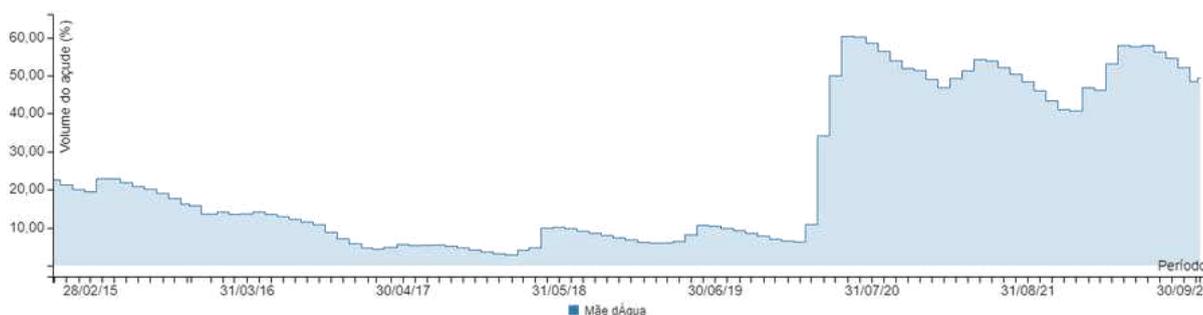
Conforme é possível observar nas Figuras 7 e 8, devido a forte crise hídrica que atingiu todo o Brasil, os açudes Coremas - Mãe D'água também ficaram com capacidade muito baixa, entre os anos de 2016 e 2018 o volume de água de ambos reservatórios ficaram no nível morto. O açude Coremas em janeiro de 2017 marcou apenas 2,43% de seu volume total, enquanto Mãe D'água tinha em janeiro de 2018 um volume total de 2,75% da sua capacidade segundo a AESA.

**Figura 7 – Registro de volume de água açude Coremas nos últimos 8 anos**



Fonte: AESA, 2022.

**Figura 8 – Registro de volume de água açude Mãe D'água nos últimos 8 anos**



Fonte: AESA, 2022.

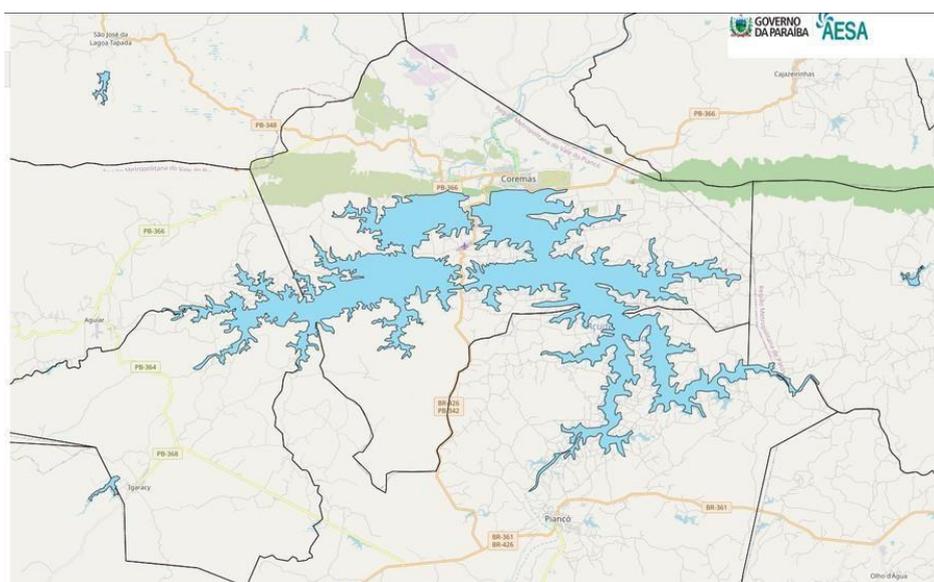
O complexo Coremas e Mãe D'água com o volume baixo e nunca visto antes, descobriu toda a parte da construção da barragem. Mostrando para a população pontos de desgaste em sua estrutura, que apresentava em sua parte interna várias rachaduras em diversos pontos ao longo da barragem. A população temendo infiltrações e até futuramente um rompimento da barragem, começou a cobrar enquanto o reservatório estava ao nível baixo, o reforço da estrutura para evitar possíveis acidentes. Assim foi feito nos anos de 2018 e 2019, toda movimentação para reforço interno da barragem, tratando as rachaduras e reforçando toda a extensão da barragem na parte externa.

### 3 Materiais e métodos

#### 3.1 Objeto de estudo

A barragem do Açude Coremas, que também conhecido como Açude Estevam Marinho em homenagem ao engenheiro que administrou a obra, está localizado no município de Coremas no interior do sertão paraibano e pertence ao sistema Coremas - Mãe D'água, que usa os barramentos dos rios Piancó (Açude Estevam Marinho) com a barragem de 47 m de altura máxima e comprimento total de 1.220 m e Aguiar (Açude Mãe D'água) com barragem de 50 m de altura máxima e comprimento total de 175 m (Figura 9).

**Figura 9 – Localização dos reservatórios do sistema Coremas - Mãe D'Água**



Fonte: AESA, 2022.

A barragem é construída utilizando terra zoneada e possui uma cortina central de concreto armado. Esta cortina é composta por placas de concreto que se estendem por toda a face de montante da barragem, cada uma medindo cinco metros de base por três metros de altura (figura 10).

**Figura 10 – Placa de concreto na montante do açude Estevam Marinho**



Fonte: Autor.

O estudo foi realizado apenas na parte a montante devido à facilidade de acesso aos dados. Já a jusante, seriam necessários outros tipos de recursos para que o estudo pudesse ser conduzido.

### 3.1.1 Aspectos estruturais e ambientais do objeto de estudo

As características construtivas da barragem estudada foram levantadas por meio de análise observacional in loco, onde foram registradas informações quanto as propriedades estruturais e condições de conservação da construção.

Quanto ao material, foi possível identificar que a barragem é composta por terra compactada em zonas e provida de uma cortina impermeabilizadora de concreto armado em formato de

placas, com 0,10 m de espessura na crista e 0,80 m na base. As faces da cortina são pintadas com inertol(R) um produto que reforça a impermeabilidade. Justaposta à cortina, há uma camada de areia grossa com 0,80 m de espessura, disposta verticalmente ao longo de sua face de jusante.

Segundo o levantamento feito em campo, a extensão pela barragem é de 1.220 metros com altura máxima calculada em 50 metros, além de sua largura no coroamento ser de exatos 10 metros.

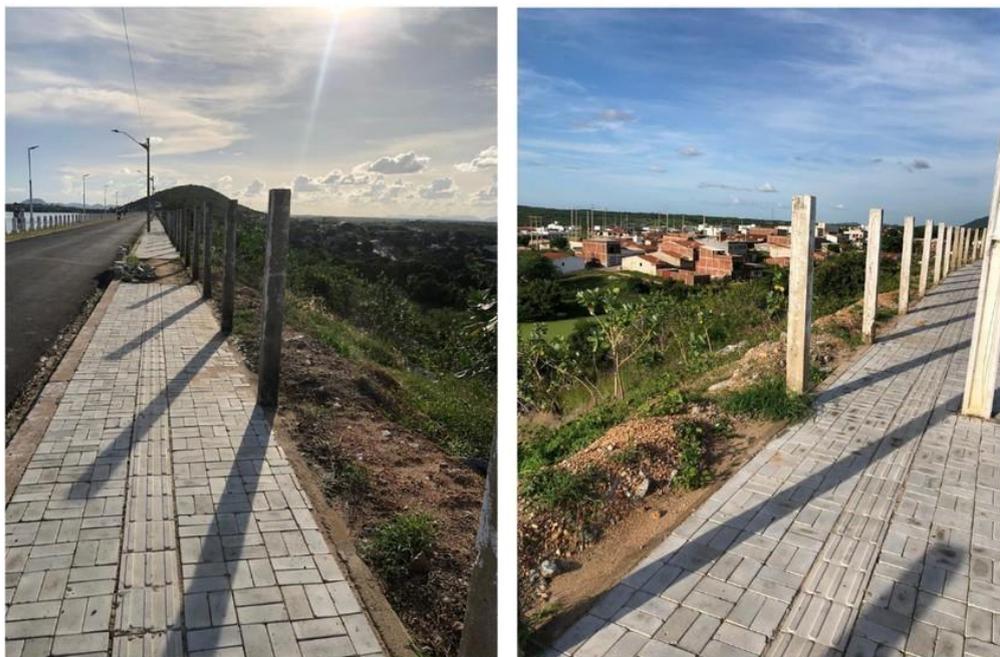
Visualmente, a barragem apresenta um bom estado de conservação, especialmente considerando o momento da pesquisa em 2023, durante o qual estão em andamento reformas e melhorias. Foi realizada uma pavimentação asfáltica sobre o calçamento já existente, e também está em processo a construção de uma calçada no lado externo (jusante) para proporcionar uma circulação mais conveniente aos inúmeros moradores que se envolvem em atividades físicas ao longo da barragem. As figuras 11, 12 e 13 apresentam detalhes sobre o estado de conservação da barragem no momento da pesquisa.

**Figura 11 – Construção de uma nova calçada destinada a pedestres**



Fonte: Autor.

**Figura 12 – Trecho da barragem em fase de construção da calçada**



Fonte: Autor.

**Figura 13 – Condição do setor montante da barragem no momento da pesquisa**



Fonte: Autor.

No que diz respeito à limpeza, figura 15, a barragem passa por manutenções periódicas

tanto em seu interior (montante) quanto em sua crista. Essas atividades incluem a remoção regular de vegetação, visando evitar que as raízes causem degradação ou enfraquecimento da barragem.

No que diz respeito à vegetação ao longo da barragem, observou-se em campo que todos os trechos avaliados, incluindo montante, crista e jusante, possuem uma vegetação de pequeno porte, característica da caatinga xerofítica. Neste ambiente, destaca-se a presença de cactáceas, arbustos e árvores de pequeno a médio porte.

A classificação climática foi realizada com base em dados obtidos da Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA). A tabela a seguir apresenta a climatologia mensal e anual em milímetros (mm).

**Figura 14 – Climatologia - AESA**

Município/Posto	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Anual (mm)
Coremas/Açude Coremas	94,1	153,7	239,6	179,3	85,3	32,8	15,6	7,0	3,5	12,8	21,5	35,4	882,3

Fonte: AESA, 2024.

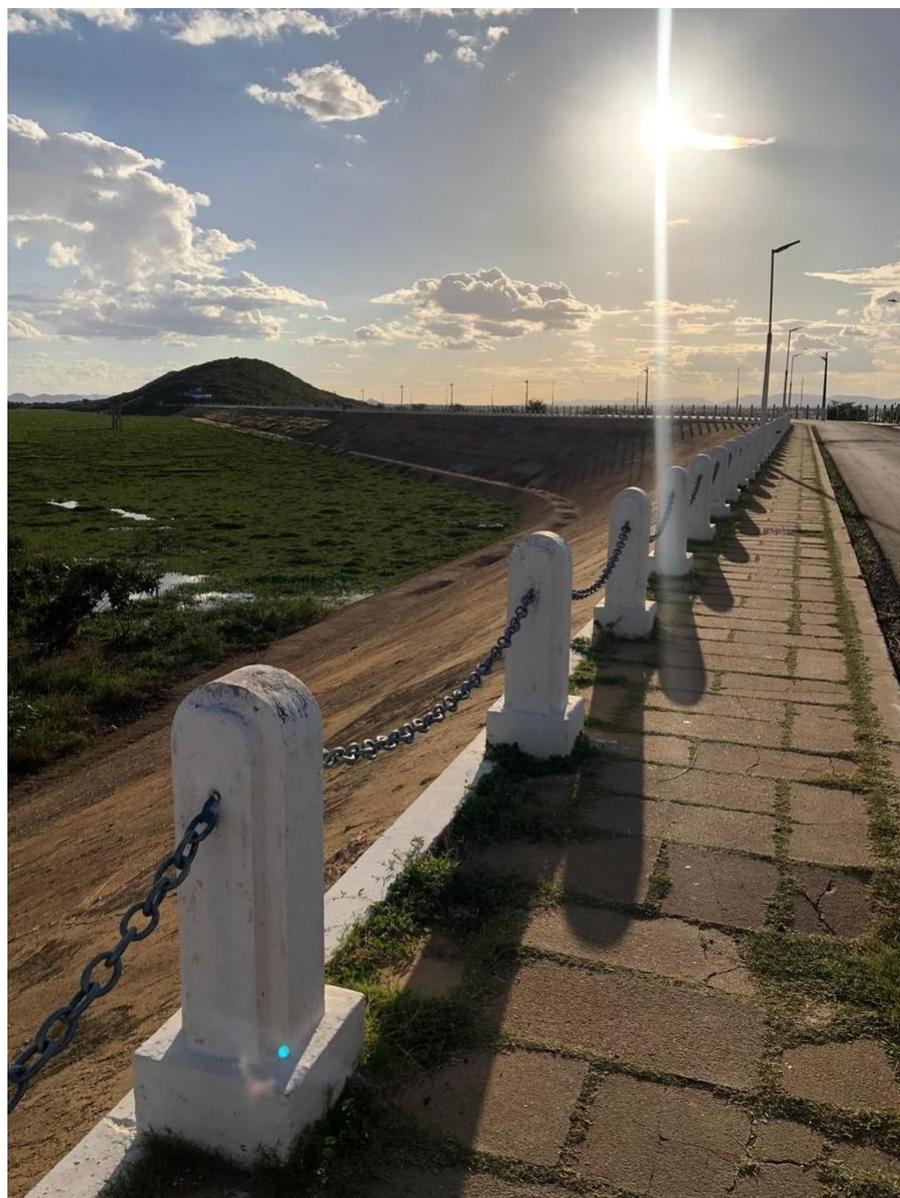
De acordo com estudo de Barbosa (2008), a temperatura média anual é superior a 26°C, com uma amplitude térmica anual inferior a 4°C. As temperaturas mais altas são observadas durante os meses mais secos, de outubro a janeiro, enquanto as temperaturas mais baixas ocorrem entre abril e julho. Na tabela 1 é possível ver os valores de temperaturas mensal e anual de Coremas.

**Tabela 1 – Temperaturas médias mensais e anual observada no posto de Coremas**

Posto	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Coremas (°C)	28,6	27	27,2	26,8	26,6	25,4	25,5	26,3	27,6	28,3	28,8	28,7	27,6

Fonte: Adaptado Barbosa, 2008.

**Figura 15 – Visão à montante da barragem**



Fonte: Autor.

**Figura 16 – Imagem de satélite da barragem do açude Estevam Marinho localizada em Coremas - PB**

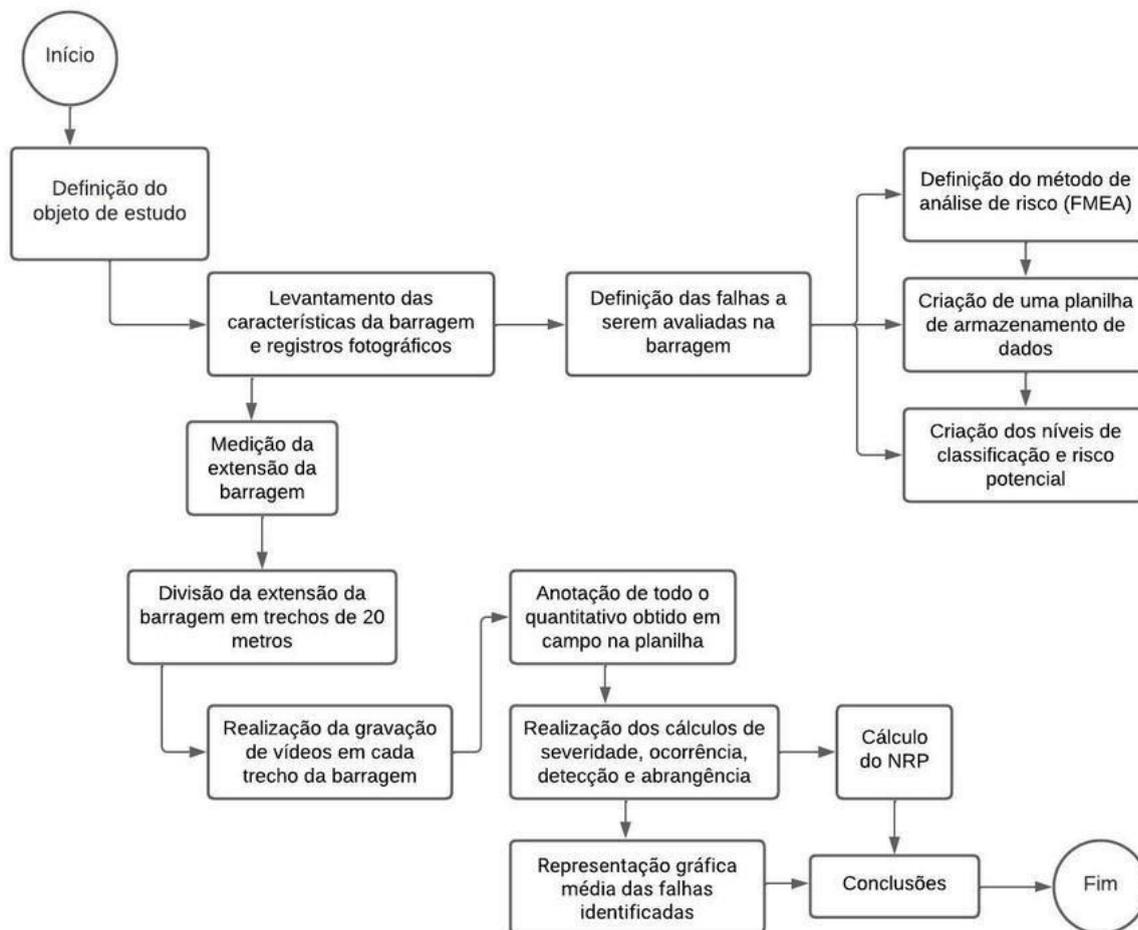


Fonte: Google Earth, 2023.

### 3.2 Métodos

Os procedimentos metodológicos para realização da pesquisa e obtenção dos resultados seguiu as etapas conforme descrito na figura 17.

Figura 17 – Fluxograma metodológico



Fonte: Autor.

Inicialmente, determinou-se que a barragem do açude Estevam Marinho seria o objeto de estudo. A partir dessa definição, foi realizado um levantamento detalhado e registro fotográfico das características da barragem. Com uma extensão total de 1.220 metros, a barragem foi dividida em trechos de amostragem a cada 20 metros para avaliar as falhas estruturais.

Optou-se pelo método de análise de risco FMEA, e uma planilha foi criada para armazenar os dados obtidos em campo, avaliando as falhas com base nos níveis de classificação de riscos potenciais para a estrutura. Após definir todos os critérios, foi feita a parte de campo, registrando vídeos de cada trecho da barragem para contabilizar e anotar os riscos encontrados.

Por fim, com os dados documentados, foram realizados os cálculos propostos no estudo, incluindo severidade, ocorrência, detecção, abrangência e nível de risco potencial (NRP). As médias das falhas identificadas foram representadas graficamente.

### 3.3 Coleta de dados

A coleta de dados foi realizada durante os dias 01 e 16 de maio de 2023, no município de Coremas, no sertão paraibano. A partir da coleta, foi possível obter os dados relacionados à barragem do açude Estevam Marinho, os quais serão utilizados para aplicação da análise FMEA.

Para aplicação do método FMEA e contagem das falhas identificadas, a barragem foi dividida em trechos de 20 metros cada, com início no trecho 0 metros. Em cada trecho foi considerando os seguintes quatro modos de falhas:

- Trincas ou rachaduras no concreto do talude;
- Desgaste nas juntas das placas de concreto;
- Obstrução das sarjetas na crista da parede;
- Vegetação presente na montante.

Ao longo dos 62 trechos, foram anotadas as quantidades em que as trincas ou rachaduras e o desgaste nas juntas das placas de concreto do talude da barragem se apresentavam. Além disso, foi verificado se havia obstrução parcial ou total das sarjetas de escoamento da crista da barragem. Por último, foi observado se entre as trincas ou rachaduras existiam baixa, ou alta presença de vegetação na montante.

O número de falhas identificadas por trecho analisado está apresentado no anexo 19.

Exemplos das falhas identificadas podem ser observadas nos anexos (20, 21, 22, 23, 24 e 25) desse estudo.

### 3.4 Níveis de classificação e risco potencial

Considerando as várias opções oferecidas pelo FMEA para fins de análise de pesquisa, foram definidos critérios de avaliação que utilizaram os indicadores médios de severidade, ocorrência, detecção e abrangência, em uma escala de graduação de 1 a 5. Esses critérios fundamentaram o cálculo do NRP (Nível de Risco Potencial) com base na equação mencionada.

$$NRP = S * O * D * A \quad (3.1)$$

Os indicadores e índices foram empregados com o propósito de avaliar a importância dos alertas e determinar a prioridade no tratamento das falhas, possibilitando, assim, a definição de estratégias para lidar com os riscos identificados. Esses indicadores receberam os graus de 1 a 5 que será explicado abaixo.

### 3.4.1 Severidade

O grau de severidade, conforme indicado na tabela 2, é determinado pelo modo de falha que pode apresentar trincas ou rachaduras no talude estrutural da barragem, a numeração do grau de severidade foi criado segundo a tabela a seguir, seguindo as falhas obtidas por trecho.

**Tabela 2 – Severidade**

<b>Grau</b>	<b>Critério</b>
1	Se o número de rachaduras no trecho forem iguais a zero
2	Se o número de trincas forem maiores que as rachaduras no trecho
3	Se o número de trincas e rachaduras forem iguais no trecho
4	Se o número de rachaduras forem maiores que as trincas no trecho
5	Se o número de trincas no trecho forem iguais a zero

Fonte: Autor.

- Rachaduras no trecho iguais a zero, isso indica que não houve ocorrência de falhas graves que pudessem ter um impacto significativo na estrutura da barragem.
- Se as trincas, for maior que o número de rachaduras no trecho, isso sugere que houve mais problemas de menor gravidade que afetaram a estrutura da barragem em comparação com problemas de maior gravidade. Isso pode indicar uma situação em que os problemas críticos são menos frequentes do que os problemas menores.
- As trincas e rachaduras forem iguais no trecho, isso significa que a barragem experimentou uma quantidade igual de problemas de menor gravidade e problemas de maior gravidade que afetaram sua estrutura. Essa igualdade pode indicar um equilíbrio na natureza das falhas e na gravidade dos problemas que a barragem enfrentou.
- Se as rachaduras forem maiores que as trincas no trecho, isso indica que a barragem teve mais problemas de maior gravidade que afetaram significativamente a sua estrutura em comparação com problemas de menor gravidade. Isso pode sugerir uma situação em que as falhas críticas são mais comuns do que as falhas menores.
- Se o número de trincas no trecho for igual a zero, isso sugere que a barragem teve mais falhas críticas ou problemas de maior gravidade. Quando não há falhas superficiais, os problemas que ocorrem podem ser mais sérios e ter um impacto significativo na estrutura da barragem. Portanto, nesse contexto, a ênfase está nas falhas críticas.

### 3.4.2 Ocorrência

A ocorrência estudada foi feita a partir do número máximo das somas das falhas encontradas na barragem (13 falhas). Foi criada uma escala e dividida em cinco graus, variando de 0,00 até 1,00. Os graus de ocorrência foram fundamentais para avaliar e priorizar ações corretivas ou melhorias em diferentes trechos da barragem, dependendo da gravidade das falhas identificadas. A divisão dos graus de ocorrência são mostradas conforme a tabela 3.

**Tabela 3 – Ocorrência**

<b>Grau</b>	<b>Critério</b>
1	Se o número de falhas no trecho for entre 0,00 e 0,23
2	Se o número de falhas no trecho for entre 0,23 e 0,46
3	Se o número de falhas no trecho for entre 0,46 e 0,69
4	Se o número de falhas no trecho for entre 0,69 e 0,92
5	Se o número de falhas no trecho for entre 0,92 e 1,00

Fonte: Autor.

- No intervalo de 0,00 e 0,23, indica haver um número limitado de falhas nesse trecho, e a quantidade total de falhas não é excessiva. Ainda assim, é importante considerar cada falha individualmente e tomar medidas para abordá-las e evitar problemas futuros.
- Se estiver dentro do intervalo de 0,23 e 0,46, isso indica que existe um número moderado de falhas nesse trecho. No entanto, ainda é fundamental lidar com essas falhas de maneira adequada para garantir a segurança e a integridade do trecho, evitando que o número de falhas aumente e cause problemas mais graves.
- Se o número de falhas no trecho estiver dentro do intervalo de 0,46 e 0,69, isso mostra a existência de um número substancial de falhas nesse trecho, mas ainda dentro de um limite gerenciável. No entanto, é crucial abordar essas falhas de maneira eficaz para evitar que aumentem ou causem problemas mais sérios. A gestão adequada dessas falhas é essencial para garantir a segurança e a funcionalidade da barragem.
- No intervalo de 0,69 e 0,92, existe um número elevado de falhas nesse trecho. Portanto, é de extrema importância lidar com essas falhas para evitar que resultem em problemas mais graves na barragem.
- Por fim, o intervalo de 0,92 e 1,00, praticamente todas as possíveis falhas no trecho foram identificadas. Nesse cenário, a quantidade de falhas é substancial e requer atenção imediata. A gestão e intervenção nesse trecho devem ser tratadas como prioridade. É

fundamental abordar e corrigir essas falhas para garantir a integridade e a segurança do trecho da barragem.

### 3.4.3 Detecção

A detecção, como indicado na tabela 4, é avaliada com base em como o modo de falha do sistema pode ser detectado, variando desde sua percepção aparente até a possibilidade de não ser identificado. Esse critério considera a eficácia da detecção de falhas no sistema.

**Tabela 4 – Detecção**

<b>Grau</b>	<b>Critério</b>
1	Detecção muito alta do modo de falha
2	Detecção alta do modo de falha
3	Detecção moderada do modo de falha
4	Detecção baixa do modo de falha
5	Detecção muito baixa do modo de falha

Fonte: Autor.

- Uma “detecção muito alta” do modo de falha indica que existe uma alta probabilidade de que qualquer falha seja rapidamente identificada e detectada. Isso ocorre devido à eficácia dos mecanismos de monitoramento e sistemas de alerta, capazes de reconhecer e sinalizar a ocorrência do modo de falha imediatamente após sua ocorrência.
- Já na “detecção alta” do modo de falha indica haver uma probabilidade considerável de que o modo de falha seja identificado e detectado com eficácia. Nesse caso, os mecanismos de monitoramento e os sistemas de alerta têm uma boa capacidade de reconhecer a ocorrência do modo de falha, embora possa haver uma pequena margem para melhorias na detecção.
- A “detecção moderada” do modo de falha implica haver uma probabilidade moderada de identificar e detectar o modo de falha. Nesse cenário, os mecanismos de monitoramento e os sistemas de alerta podem identificar a ocorrência do modo de falha, mas com uma eficácia limitada.
- Na categoria de “detecção baixa” há uma probabilidade reduzida de identificar e detectar o modo de falha. Isso sugere que os sistemas de alerta têm dificuldades em reconhecer a ocorrência do modo de falha, o que pode resultar em atrasos na detecção. Isso é preocupante, pois a resposta a falhas pode ser ineficaz devido à baixa capacidade de identificação.

- No critério de “detecção muito baixa” indica uma probabilidade muito reduzida de identificar e detectar o modo de falha. Os alertas têm uma capacidade extremamente limitada de reconhecer a ocorrência do modo de falha. Em situações de detecção muito baixa, a resposta a falhas pode ser altamente ineficaz devido à quase inexistente capacidade de identificação. Essa é uma condição crítica que requer medidas urgentes para melhorar os sistemas de monitoramento e alertas.

#### 3.4.4 Abrangência

Conforme a tabela 5, a avaliação da abrangência foi feita considerando a extensão em que a falha pode impactar, variando desde atingir um componente específico do sistema até provocar impactos ambientais mais amplos na barragem. Este critério foi dividido em 5 intervalos iguais, considerando a soma do maior número de falhas encontrado no estudo da barragem. Essa abordagem fornece uma maneira estruturada de categorizar a extensão dos efeitos das falhas, facilitando a identificação das áreas de maior preocupação em abrangência e impacto.

**Tabela 5 – Abrangência**

<b>Grau</b>	<b>Critério</b>
1	Abrangência muito baixa com valores entre 0 e 2,6
2	Abrangência baixa com valores entre 2,7 e 5,2
3	Abrangência moderada com valores entre 5,3 e 7,8
4	Abrangência alta com valores entre 7,9 e 10,4
5	Abrangência muito alta com valores entre 10,5 e 13

Fonte: Autor.

- Uma “abrangência muito baixa” com valores entre 0 e 2,6 sugere que a falha tem uma extensão limitada, atingindo apenas um componente específico do sistema. Nesse intervalo, os efeitos da falha são considerados localizados e não se estendem significativamente além do componente afetado. Essa classificação indica uma abrangência restrita a impacto, indicando que os efeitos da falha são relativamente contidos.
- “Abrangência baixa” com valores entre 2,7 e 5,2 indica que a falha tem uma extensão moderada, atingindo mais do que um componente específico do sistema, mas ainda com limitações geográficas e funcionais. Nesse intervalo, os efeitos da falha podem ser mais amplos do que na categoria de abrangência muito baixa, mas ainda são considerados relativamente localizados. Isso sugere que a falha pode afetar múltiplos componentes, mas seus impactos ainda são contidos em certa medida.

- “Abrangência moderada” com valores entre 5,3 e 7,8 sugere que a falha tem uma extensão mais substancial, atingindo vários componentes do sistema. Nesse intervalo, os efeitos da falha se estendem além de uma área localizada, abrangendo uma porção mais significativa do sistema. Isso indica que a falha pode ter impactos mais amplos, afetando diversos componentes da barragem. É importante considerar medidas de mitigação e resposta apropriadas para lidar com essa extensão mais abrangente.
- Com uma “abrangência alta” com valores entre 7,9 e 10,4 indica que a falha tem uma extensão considerável, atingindo uma porção substancial do sistema. Nesse intervalo, os efeitos da falha são abrangentes e podem afetar significativamente vários componentes da barragem. Isso destaca a importância de implementar medidas robustas de mitigação e resposta para lidar com os impactos mais amplos dessa falha. Ações preventivas e de gerenciamento de riscos podem ser cruciais para garantir a segurança e a funcionalidade da barragem diante de uma abrangência alta de falhas.
- A “abrangência muito alta” com valores entre 10,5 e 13 indica que a falha tem uma extensão máxima, atingindo praticamente todos os componentes do sistema. Nesse intervalo, os efeitos da falha são extremamente abrangentes, afetando amplamente a barragem. Isso ressalta a crítica importância de ações imediatas e abrangentes para lidar com essa falha. Medidas de mitigação, prevenção e resposta devem ser implementadas de maneira urgente para minimizar os impactos negativos e garantir a segurança e a estabilidade da barragem.

### 3.5 Organização e análise de dados

Para facilitar o entendimento e a familiarização com o FMEA, foram apresentadas tabelas com os graus de severidade, ocorrência, abrangência e detecção. Utilizando essas tabelas, a planilha do FMEA foi preenchida conforme os modos de falha identificados nos 62 trechos avaliados.

Com todos os dados preenchidos a partir da análise de campo, as informações foram transcritas e organizadas na planilha do FMEA utilizando o programa Excel.

Com a digitalização de todas as informações, foi possível montar uma matriz de dados para cruzar as informações coletadas. Assim, utilizando essa amostragem, foi possível elaborar um ranking dos riscos mais críticos na barragem em estudo.

Para a avaliação dos resultados, foram criadas quatro tabelas individuais conforme o item, modos de falhas, grau de risco total, presença dos riscos em diferentes trechos e a média desses riscos, tendo como fórmula:

$$Media = \frac{\text{Risco Total}}{\text{Numero de Trechos}} \quad (3.2)$$

Na avaliação do resultado do NRP, foi montada uma tabela reunindo os itens, modos de falhas, componentes, as médias S.O.D.A e o cálculo do nível de risco potencial, cuja fórmula é a 3.1.

## 4 Resultados e Discussões

### 4.1 Método da análise FMEA

Para a pesquisa aplicada a barragem do sistema de reservatório de Coremas, a técnica implementada e critérios avaliados seguem a sequência apresentada na tabela 6.

**Tabela 6 – Modo de falha e falhas da barragem em estudo**

<b>Modo de falha</b>	<b>Falha</b>
Integridade no concreto do talude	Presença de trincas no concreto do talude
	Presença de rachaduras no concreto do talude
Desgaste nas juntas das placas de concreto	Presença de desgaste parcial nas placas de concreto
	Presença de desgaste completo nas placas de concreto
Obstrução das sarjetas na crista da parede	Obstrução parcial das sarjetas
	Obstrução completa das sarjetas
Vegetação presente na montante	Baixa presença de vegetação entre as trincas e rachaduras da montante
	Alta presença de vegetação entre as trincas e rachaduras da montante

Fonte: Autor.

Inicialmente, foi realizada uma investigação de todas as possíveis falhas e pontos críticos de controle presentes no objeto de estudo. Essa análise detalhada permitiu uma avaliação criteriosa da conservação estrutural da barragem do açude de Coremas.

Com base nos dados quantitativos obtidos em cada trecho analisado, conforme apresentado no anexo 19, foi calculada uma média entre os graus de risco, que incluem severidade, ocorrência, detecção e abrangência.

Os graus de análise do FMEA foram definidos com base nos dois tipos de falhas por modo apresentados nos 62 trechos avaliados. Isso permitiu evidenciar as diferenças entre os dados obtidos para cada modo de falha e estabelecer os parâmetros de avaliação, variando de nível 1 a 5.

### 4.2 Avaliação da severidade aplicada aos modos de falha

O quadro 1 apresenta a avaliação geral da severidade aplicada aos modos de falhas do objeto de estudo, permitindo obter uma média dos graus de severidade.

**Quadro 1 – Avaliação da severidade dos modos de falha**

<b>Item</b>	<b>Modos de Falha</b>	<b>Severidade Total</b>	<b>Presença em trechos</b>	<b>Média de Severidade</b>
<b>1</b>	Integridade no concreto do talude	150	62	2,42
<b>2</b>	Desgaste nas juntas das placas de concreto	206	62	3,32
<b>3</b>	Obstrução das sarjetas na crista da parede	24	8	3,00
<b>4</b>	Vegetação presente na montante	176	62	2,84

Fonte: Autor.

A análise destacou que o desgaste nas juntas das placas de concreto é o risco mais elevado, com um índice de severidade total de 206 e uma média de 3,32, indicando a necessidade de ações imediatas de mitigação. Em contraste, a obstrução das sarjetas na crista da parede, com um índice de severidade total de 24 e uma média de 3,00, foi classificada como um risco mediano, principalmente devido à sua presença limitada a 8 trechos avaliados.

A vegetação presente na montante, com um índice de severidade total de 176 e uma média de 2,84, foi classificada como um risco baixo. A integridade no concreto do talude apresentaram o menor índice de severidade total de 150 e uma média de 2,42, indicando um potencial de risco relativamente menor para a barragem.

Essa avaliação proporciona uma base científica e técnica para a priorização de ações corretivas e a implementação de medidas de segurança. A identificação precisa dos modos de falha mais críticos permite direcionar recursos de forma eficiente, garantindo a manutenção da integridade estrutural e a segurança da barragem. A análise também destaca a importância de monitoramento contínuo e intervenções regulares para mitigar os riscos identificados e assegurar a longevidade e funcionalidade da barragem do açude Estevam Marinho.

### 4.3 Avaliação da ocorrência aplicada aos modos de falha

No quadro 2 estão apresentados os dados referentes a análise do grau de ocorrência em cada modo de falha.

**Quadro 2 – Avaliação da ocorrência dos modos de falha**

Item	Modos de falha	Ocorrência Total	Presença em Trechos	Média de Ocorrência
1	Integridade no concreto do talude	163	62	2,63
2	Desgaste nas juntas das placas de concreto	143	62	2,31
3	Obstrução das sarjetas na crista da parede	8	8	1,00
4	Vegetação presente na montante	163	62	2,63

Fonte: Autor.

A avaliação da ocorrência nos modos de falha, observa-se que os modos “integridade no concreto do talude” e “vegetação presente na montante” apresentaram o maior índice de ocorrência, com um valor de 163, estando presentes em todos os 62 trechos analisados e resultando em uma média de 2,63. Isso destaca a necessidade de atenção especial a essas falhas devido à sua alta frequência.

O “desgaste nas juntas das placas de concreto” também apresentou uma ocorrência significativa, com um índice total de 143 e uma média de 2,31, sendo classificado como um risco potencial mediano. Apesar de sua classificação, este desgaste ainda demanda manutenções regulares ao longo do objeto de estudo para prevenir agravamentos.

Por outro lado, a “obstrução das sarjetas na crista da parede” mostrou-se como o modo de falha com menor risco potencial, com um índice de ocorrência de 8, presente em apenas 8 trechos, e uma média de 1,00. Este modo de falha ocorreu em apenas 12,90% da extensão avaliada, indicando um menor impacto em relação aos outros modos de falha estudados.

A análise revela que enquanto algumas falhas são amplamente disseminadas e exigem ações corretivas imediatas, outras apresentam menor incidência, portanto, representam um risco menor. No entanto, todas as falhas identificadas necessitam de monitoramento e manutenção contínuos para garantir a integridade da barragem.

#### 4.4 Avaliação da detecção aplicada aos modos de falha

O quadro 3 mostra a avaliação do grau de detecção para cada modo de falha, permitindo a verificação do nível de falhas e a priorização das intervenções necessárias.

**Quadro 3 – Avaliação da detecção dos modos de falha**

Item	Modos de falha	Detecção Total	Presença em Trechos	Média de Detecção
1	Integridade no concreto do talude	167	62	2,69
2	Desgaste nas juntas das placas de concreto	206	62	3,32
3	Obstrução das sarjetas na crista da parede	40	8	5,00
4	Vegetação presente na montante	178	62	2,87

Fonte: Autor.

A avaliação da detecção nos modos de falha revelou percepções importantes sobre a condição e os riscos associados aos diferentes elementos analisados. A obstrução das sarjetas na crista da parede foi o índice com a menor detecção, apresentando uma média de 5,00, indicando uma detecção muito baixa e sugere que este problema pode passar despercebido sem uma inspeção cuidadosa.

Por outro lado, a integridade no concreto do talude e a vegetação presente na montante apresentaram altas taxas de detecção, com médias de 2,69 e 2,87, respectivamente. Estes modos de falha foram consistentemente identificados nos 62 trechos avaliados, indicando uma detecção elevada e a necessidade de atenção imediata para mitigar os riscos associados.

O desgaste nas juntas das placas de concreto, com uma média de detecção de 3,32, foi classificado como tendo uma detecção moderada. Embora não seja tão crítica quanto as rachaduras, este problema ainda requer manutenções periódicas para prevenir deteriorações mais severas.

Em resumo, a análise dos dados aponta para uma variabilidade na detecção dos modos de falha, destacando áreas que necessitam de intervenções imediatas e contínuas. A alta detecção de certas falhas sugere um bom nível de monitoramento, enquanto as falhas com baixa detecção indicam áreas onde os processos de inspeção devem ser aprimorados. As manutenções periódicas são essenciais para assegurar a integridade e a segurança das estruturas avaliadas.

#### 4.5 Avaliação da Abrangência aplicada aos modos de falha

O quadro 4 mostra a avaliação conforme a abrangência de cada modo de falha, permitindo identificar quais modos possuem a maior e a menor extensão das falhas.

**Quadro 4 – Avaliação da abrangência dos modos de falha**

Item	Modos de falha	Abrangência Total	Presença em Trechos	Média de Abrangência
1	Integridade no concreto do talude	174	62	2,81
2	Desgaste nas juntas das placas de concreto	144	62	2,32
3	Obstrução das sarjetas na crista da parede	8	8	1,00
4	Vegetação presente na montante	166	62	2,68

Fonte: Autor.

Com base na avaliação da abrangência nos modos de falhas, foi possível identificar e classificar diferentes tipos de falhas na barragem em estudo. A obstrução das sarjetas na crista da parede apresentou a menor preocupação, com uma média de 1,00, indicando uma abrangência muito baixa. O desgaste nas juntas das placas de concreto, com uma média de 2,32, e a vegetação presente na montante, com uma média de 2,68, ambas mostraram uma abrangência baixa a moderada, sugerindo a necessidade de manutenção e monitoramento regular.

A integridade no concreto do talude destacou-se com a maior abrangência total, tendo um índice de 174 e uma média de 2,81. Esta falha, presente em todos os trechos avaliados, foi classificada como a mais crítica, necessitando de supervisão contínua e medidas de preservação urgentes para assegurar a estabilidade da barragem.

Enquanto algumas falhas apresentam menor risco e demandam intervenções menos frequentes, outras, como as rachaduras no concreto do talude, requerem atenção prioritária. Este estudo de abrangência permite direcionar os esforços de manutenção de forma eficaz, priorizando os modos de falha que representam maior ameaça à integridade da barragem.

#### 4.6 Avaliação geral dos modos de falhas e cálculo do nível de risco potencial (NRP)

O quadro a seguir exibe as médias dos níveis de classificação de risco potencial, severidade (S), ocorrência (O), detecção (D) e abrangência (A), além dos componentes e o cálculo do nível de risco potencial (NRP) dos modos de falha da barragem Estevam Marinho.

**Quadro 5 – Cálculo nível de risco potencial (NRP) aplicado aos modos de falhas**

Item	Modos de Falhas	Componente	S	O	D	A	NRP
1	Integridade no concreto do talude	Proteção da montante	2,42	2,63	2,69	2,81	48,08
2	Desgaste nas juntas das placas de concreto	Proteção da montante	3,32	2,31	3,32	2,32	59,14
3	Obstrução das sarjetas na crista da parede	Escoamento da crista da barragem	3,00	1,00	5,00	1,00	15,00
4	Vegetação presente na montante	Proteção da montante	2,84	2,63	2,87	2,68	57,37

Fonte: Autor.

A análise dos modos de falha da barragem Estevam Marinho revelou diferentes níveis de risco potencial, variando de 15,00 a 59,14, destacando áreas críticas que necessitam de intervenções imediatas e contínuas.

O menor índice de risco potencial foi observado no modo de obstrução das sarjetas na crista da parede, com um valor de 15,00. Essa falha é causada principalmente pelo acúmulo de lixo deixado por visitantes, agravada pela ação das chuvas. O entupimento resultante forma poças d'água, que podem provocar erosões e infiltrações na barragem, comprometendo sua resistência (figura 18). A prevenção eficaz exige a implementação de limpezas periódicas em todas as sarjetas, o que atualmente não é praticado de maneira uniforme.

**Figura 18 – Sarjetas com obstruções no momento do estudo**

Fonte: Autor.

A integridade no concreto do talude apresentou um índice de risco de 48,08. Esse problema resulta de erosões naturais e exposição às intempéries, levando a infiltrações que comprometem a estrutura e a disponibilidade hídrica do açude. Embora haja manutenção parcial, a última intervenção abrangente foi realizada em 2017, em áreas já significativamente danificadas.

A vegetação presente na montante foi identificada como um dos modos de falha com maior risco, com um índice de 57,37. O crescimento da vegetação nas trincas, rachaduras e juntas das placas de concreto agrava os danos estruturais. A prevenção requer roçadas periódicas com a correção das trincas e rachaduras, mas atualmente apenas as roçadas são feitas, sem a reparação das trincas e rachaduras para diminuir a probabilidade de ocorrência do problema.

O desgaste nas juntas das placas de concreto, com o maior índice de risco de 59,14, representa a falha mais crítica. Esse desgaste ocorre principalmente devido ao intemperismo e à dilatação das placas, que se movem uma em direção à outra devido ao enfraquecimento ou

ausência do material das juntas. A prevenção eficaz requer fiscalização constante e nova aplicação de produtos entre as juntas.

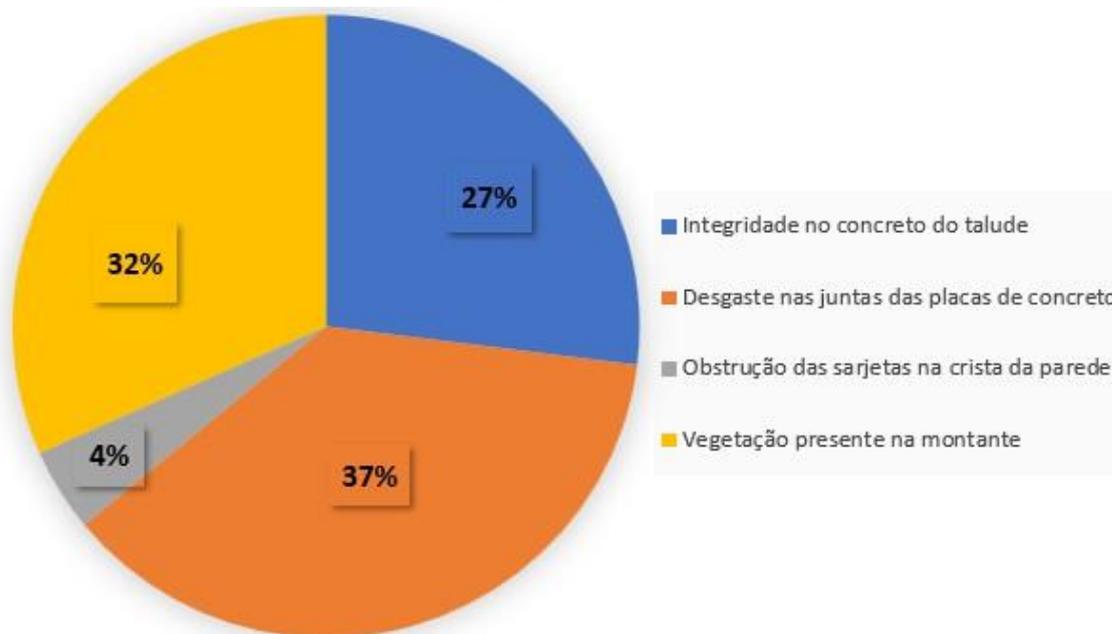
Em resumo, a barragem Estevam Marinho enfrenta diversos modos de falha com diferentes níveis de risco, desde obstruções simples até desgastes críticos nas juntas das placas de concreto. A implementação de um programa de manutenção regular e abrangente é crucial para mitigar esses riscos, garantindo a segurança e a funcionalidade contínua da barragem.

#### 4.7 Gráficos

Com base nas análises das tabelas de avaliações, foram elaborados gráficos que apresentam as porcentagens de cada modo de falha em relação à avaliação total dos potenciais de risco. Esses gráficos permitiram identificar os níveis de risco mais baixos e mais altos.

O gráfico 1, que é correspondente ao quadro 1, que avalia a severidade dos modos de falha com base no índice de severidade total. A análise revelou que a maior porcentagem, 37%, corresponde ao desgaste nas juntas das placas de concreto, indicando que este é o modo de falha com o maior impacto dentre os avaliados.

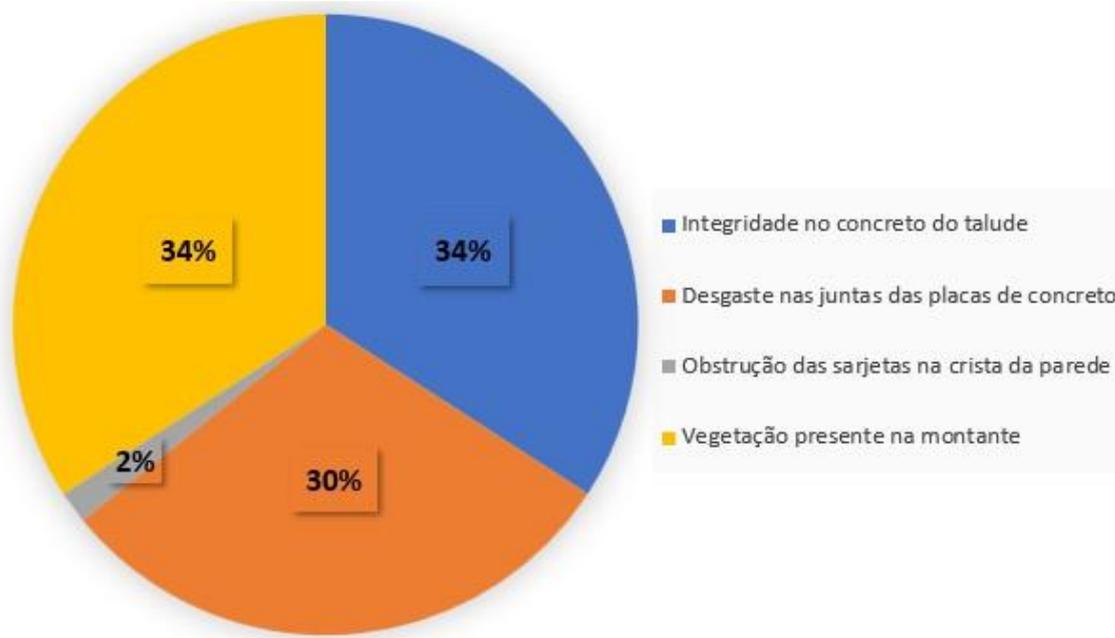
**Gráfico 1 – Gráfico da avaliação da severidade nos modos de falha**



Fonte: Autor.

No gráfico 2, que é correspondente ao quadro 2, que avalia a ocorrência dos modos de falha utilizando o índice de ocorrência total. A análise revelou que os modos de falha “integridade no concreto do talude” e “vegetação presente na montante” apresentaram a maior porcentagem, 34%. Em contraste, a “obstrução das sarjetas” teve a menor porcentagem, apenas 2%, indicando uma ocorrência praticamente insignificante.

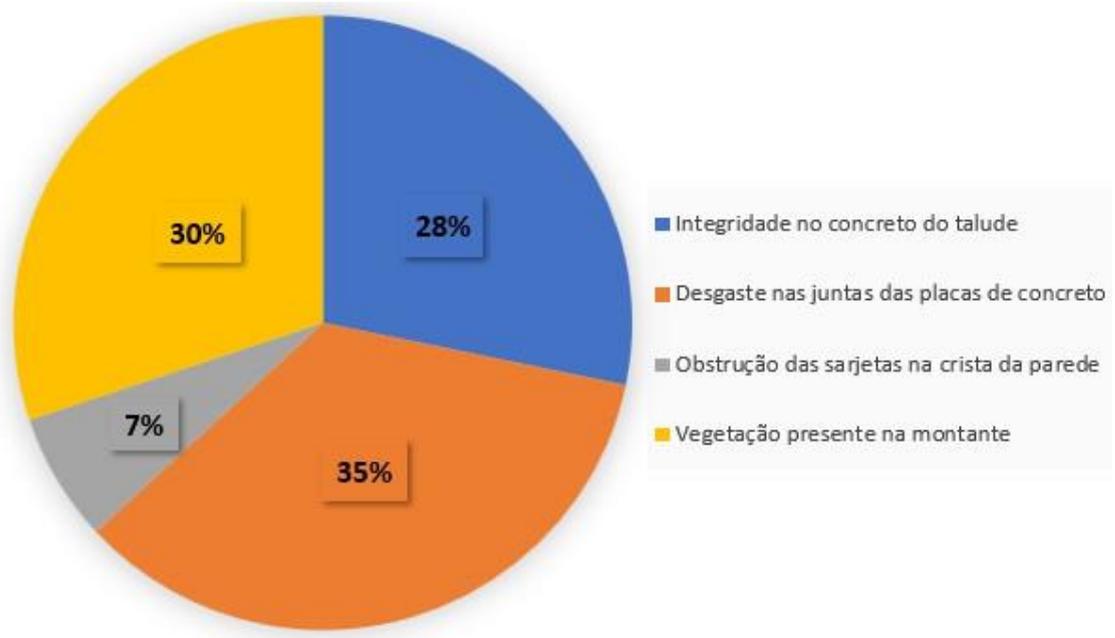
Gráfico 2 – Gráfico da avaliação da ocorrência nos modos de falha



Fonte: Autor.

No gráfico 3, é apresentado um gráfico correspondente ao quadro 3, que avalia a detecção dos modos de falha com base no índice de detecção total. A análise concluiu que o desgaste nas juntas das placas de concreto foi o modo de falha com a maior porcentagem de detecção, 35%. Esse foi seguido pelos modos “vegetação presente na montante” com 30%, “integridade no concreto do talude” com 28%, e “obstrução das sarjetas na crista da parede” com 7%.

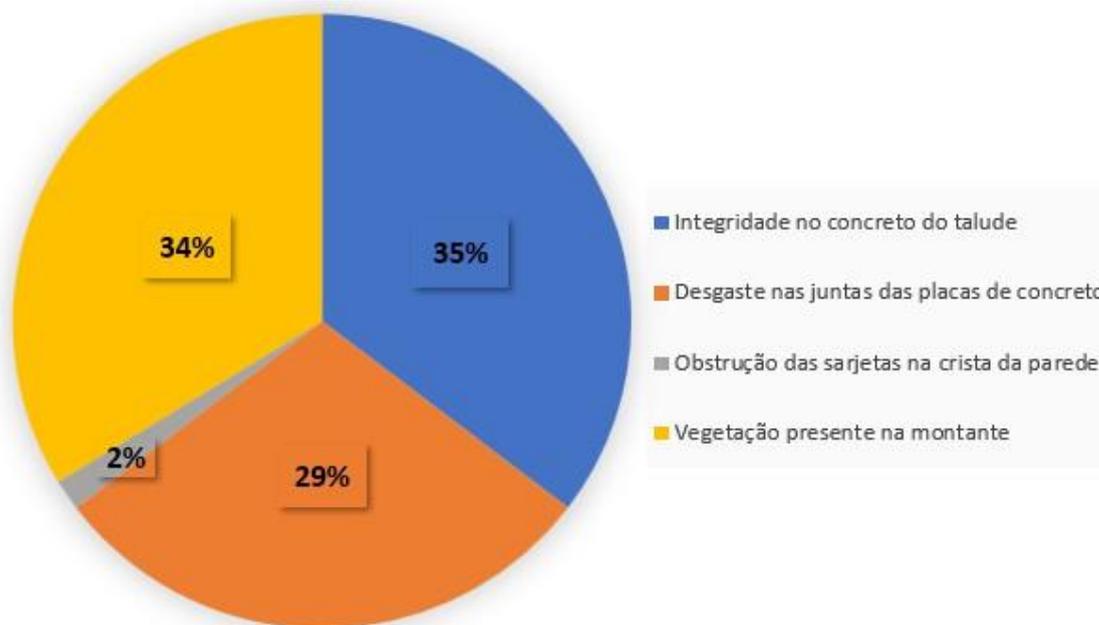
Gráfico 3 – Gráfico da avaliação da detecção nos modos de falha



Fonte: Autor.

O gráfico 4, que corresponde ao quadro 4, são avaliados os riscos dos modos de falha com base no índice de abrangência total. A análise mostrou que a maior porcentagem de abrangência, 35%, foi para “integridade no concreto do talude”, seguida de perto por “vegetação presente na montante” com 34%. Em contraste, a “obstrução das sarjetas na crista da parede” teve uma abrangência quase nula, com apenas 2%, em comparação com as demais falhas.

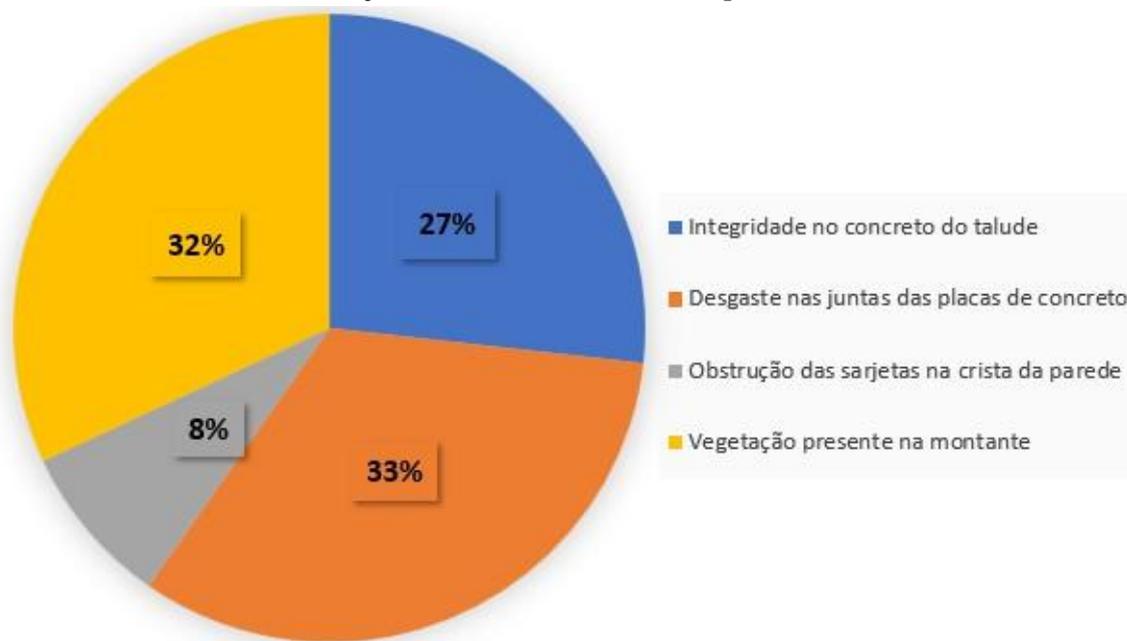
**Gráfico 4 – Gráfico da avaliação da abrangência nos modos de falha**



Fonte: Autor.

O gráfico 5, que representa os dados do quadro 5, foram avaliados os modos de falha com base no cálculo dos índices de NRP. A análise concluiu que o desgaste nas juntas das placas de concreto obteve a maior porcentagem, 33%, seguido pela vegetação presente na montante com 32%. Esses resultados indicam que ambos os modos de falha necessitam de maior fiscalização e ação corretiva para a preservação da barragem. Em contraste, a obstrução das sarjetas apresentou o menor valor, 8%, indicando que, em uma escala de prioridade, não requer muita intervenção.

**Gráfico 5 – Gráfico da avaliação de acordo com NRP médio aplicado aos modos de falhas**

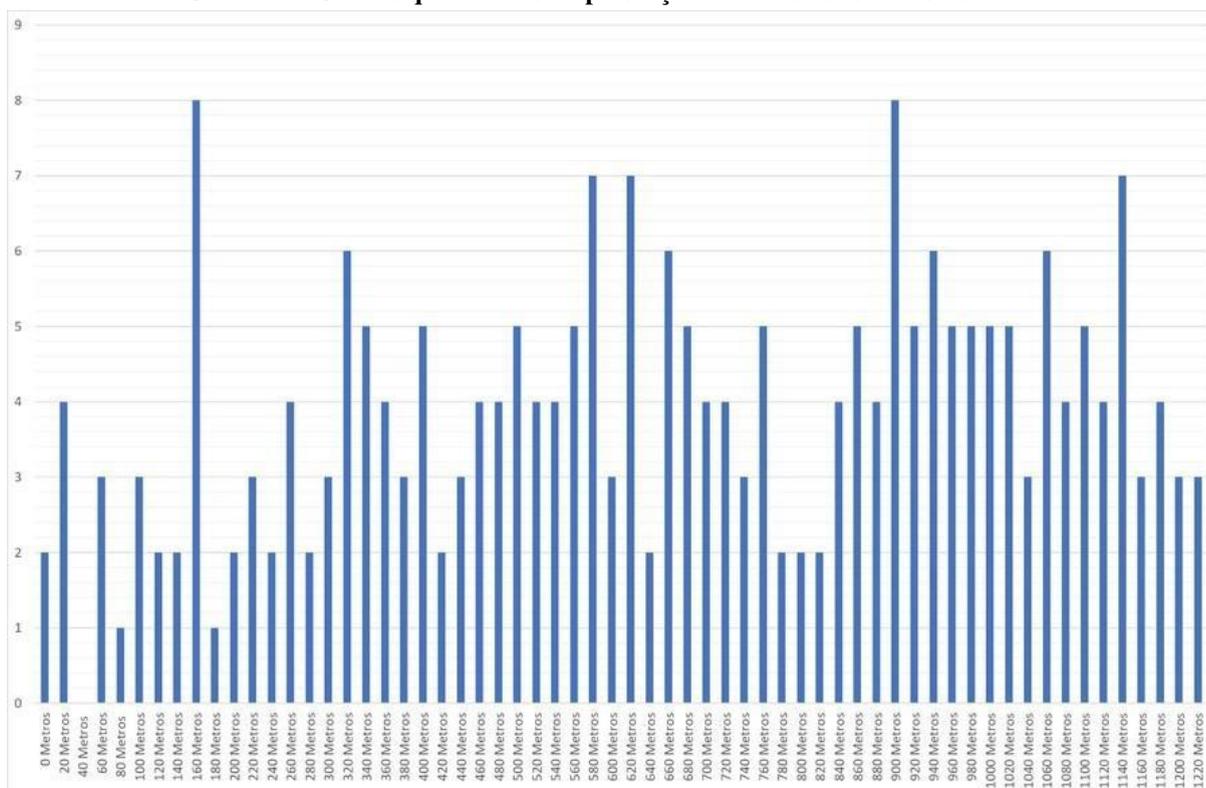


Fonte: Autor.

Conforme os dados apresentados no anexo 19, foram elaborados gráficos que representam o número de falhas em cada trecho analisado.

O gráfico 6 mostra a presença de trincas no concreto do talude. Concluiu-se que os trechos de 160 metros e 900 metros apresentaram o maior número de falhas, com 8 cada um, enquanto o trecho de 40 metros foi o único que não registrou nenhuma trinca.

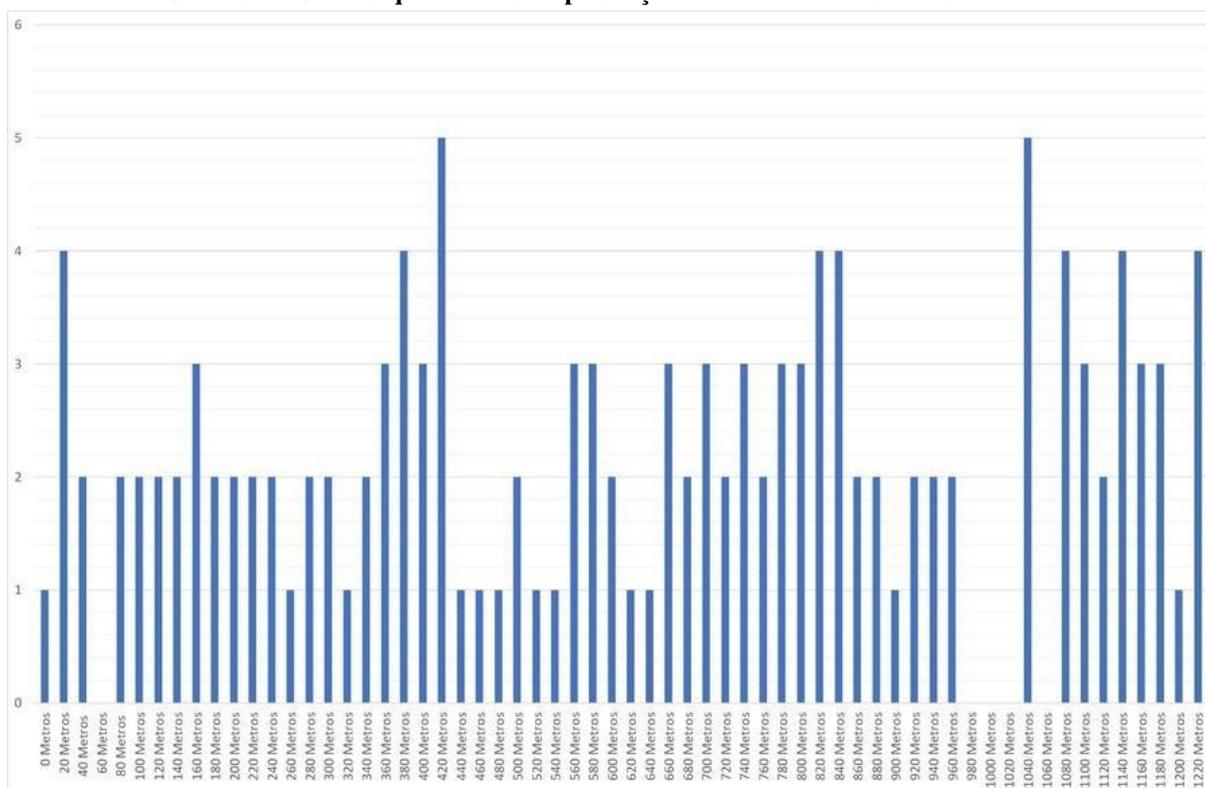
Gráfico 6 – Gráfico quantitativo da presença de trincas no concreto do talude



Fonte: Autor.

O gráfico 7 apresenta a presença de rachaduras no concreto do talude. Observa-se que os trechos de 420 metros e 1.040 metros tiveram o maior número de falhas, com 5 cada um. Em contrapartida, os trechos de 60, 980, 1.000, 1.020 e 1.060 metros não registraram nenhuma rachadura.

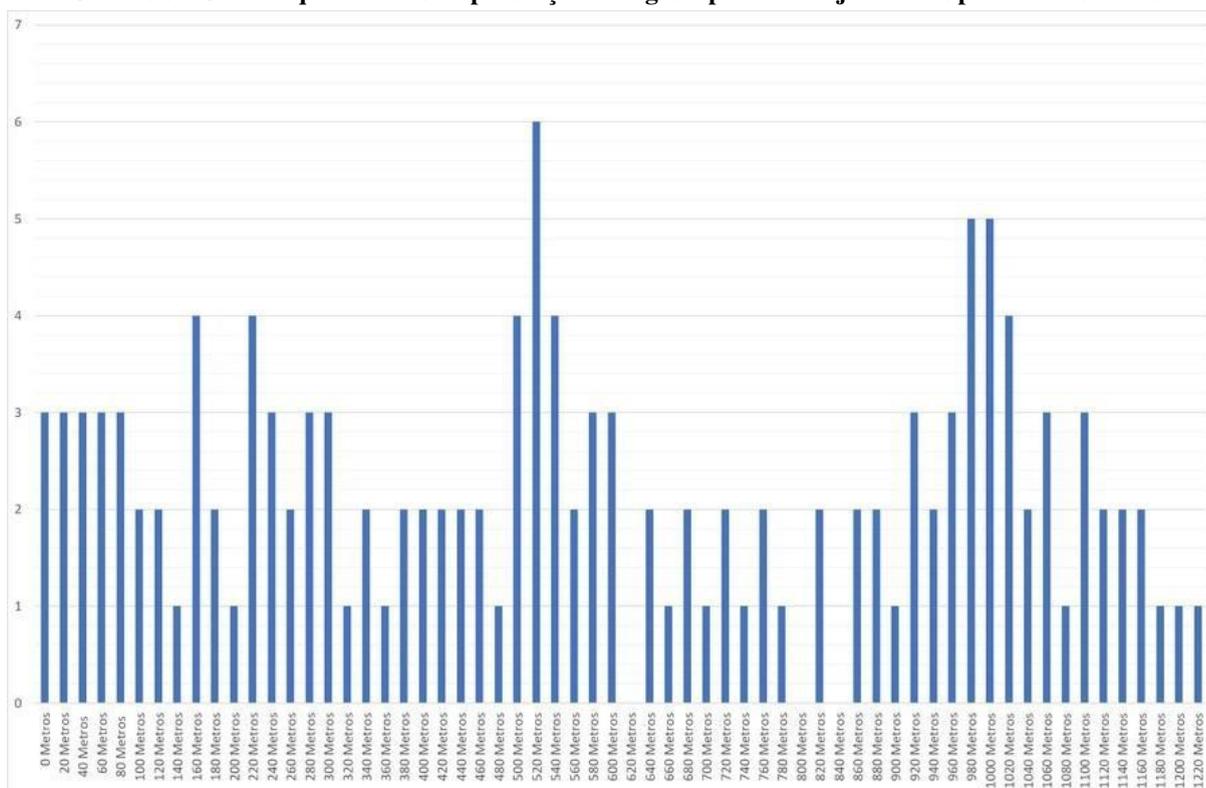
Gráfico 7 – Gráfico quantitativo da presença de rachadura no concreto do talude



Fonte: Autor.

O gráfico 8 mostra a presença de desgaste parcial nas juntas das placas de concreto. Verifica-se que o trecho de 520 metros teve o maior número de falhas, com 6 ocorrências. Em contraste, os trechos de 620, 800 e 860 metros não apresentaram nenhum desgaste parcial.

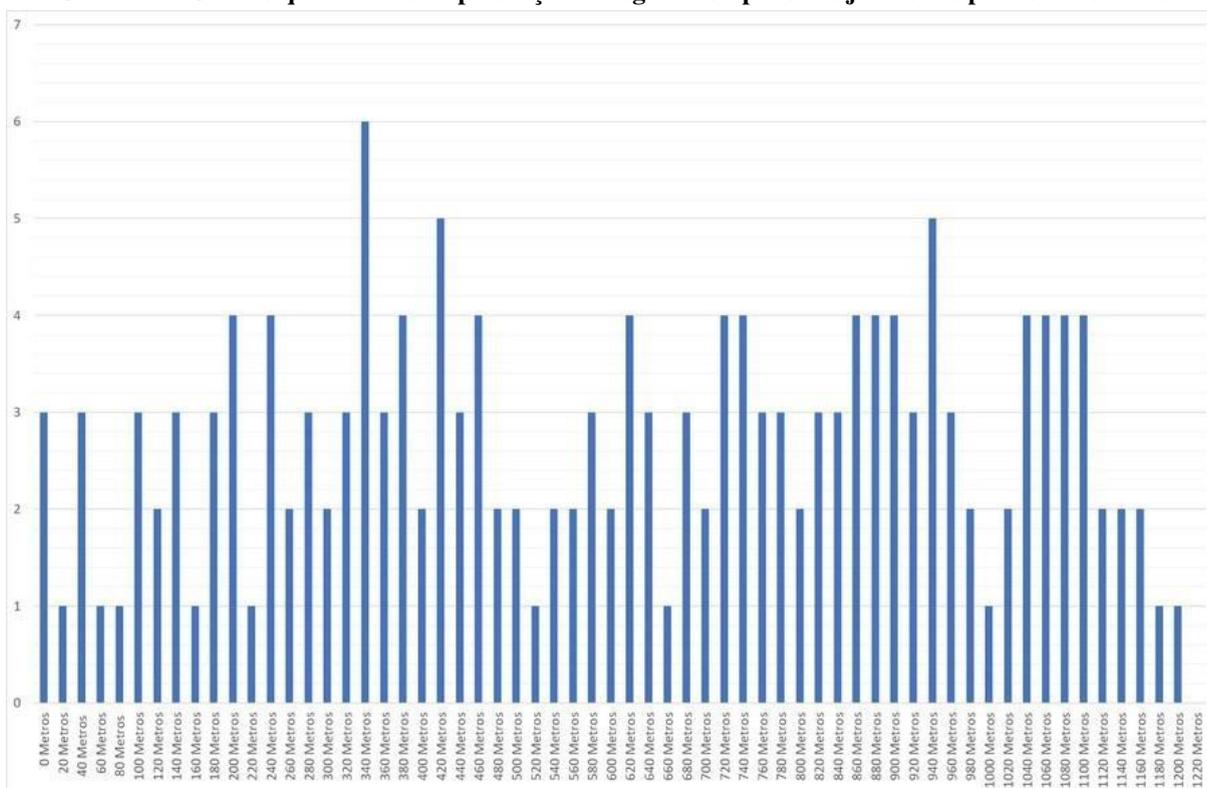
**Gráfico 8 – Gráfico quantitativo da presença de desgaste parcial nas juntas das placas de concreto**



Fonte: Autor.

O gráfico 9 exibe a presença de desgaste completo nas juntas das placas de concreto. Nota-se que o trecho de 340 metros registrou o maior número de falhas, com 6 ocorrências. Por outro lado, o único trecho que não apresentou desgaste completo das juntas foi o de 1.220 metros.

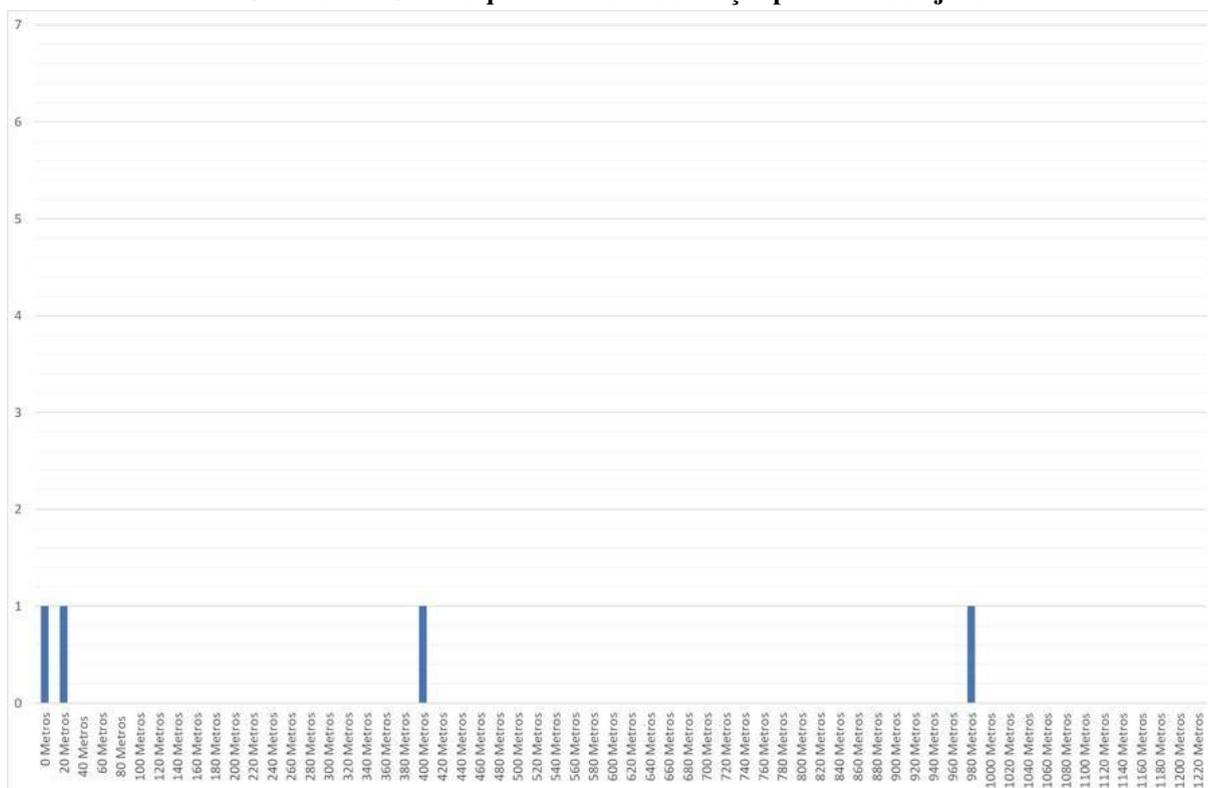
**Gráfico 9 – Gráfico quantitativo da presença de desgaste completo nas juntas das placas de concreto**



Fonte: Autor.

O gráfico 10 mostra a obstrução parcial das sarjetas. Verifica-se que os trechos com valores de obstrução parcial são 0, 20, 400 e 980 metros.

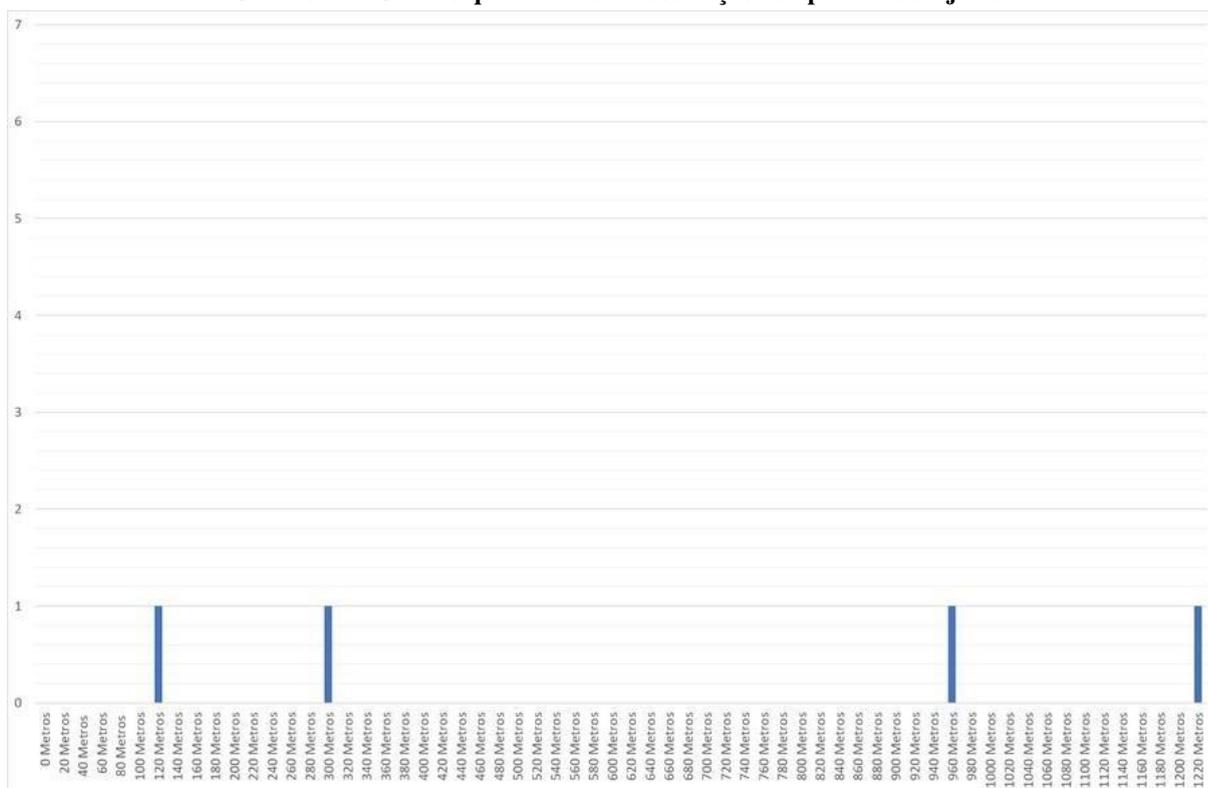
Gráfico 10 – Gráfico quantitativo da obstrução parcial das sarjetas



Fonte: Autor.

O gráfico 11 exibe a obstrução completa das sarjetas. É perceptível que os trechos com valores de obstrução completa foram 120, 300, 960 e 1.220 metros.

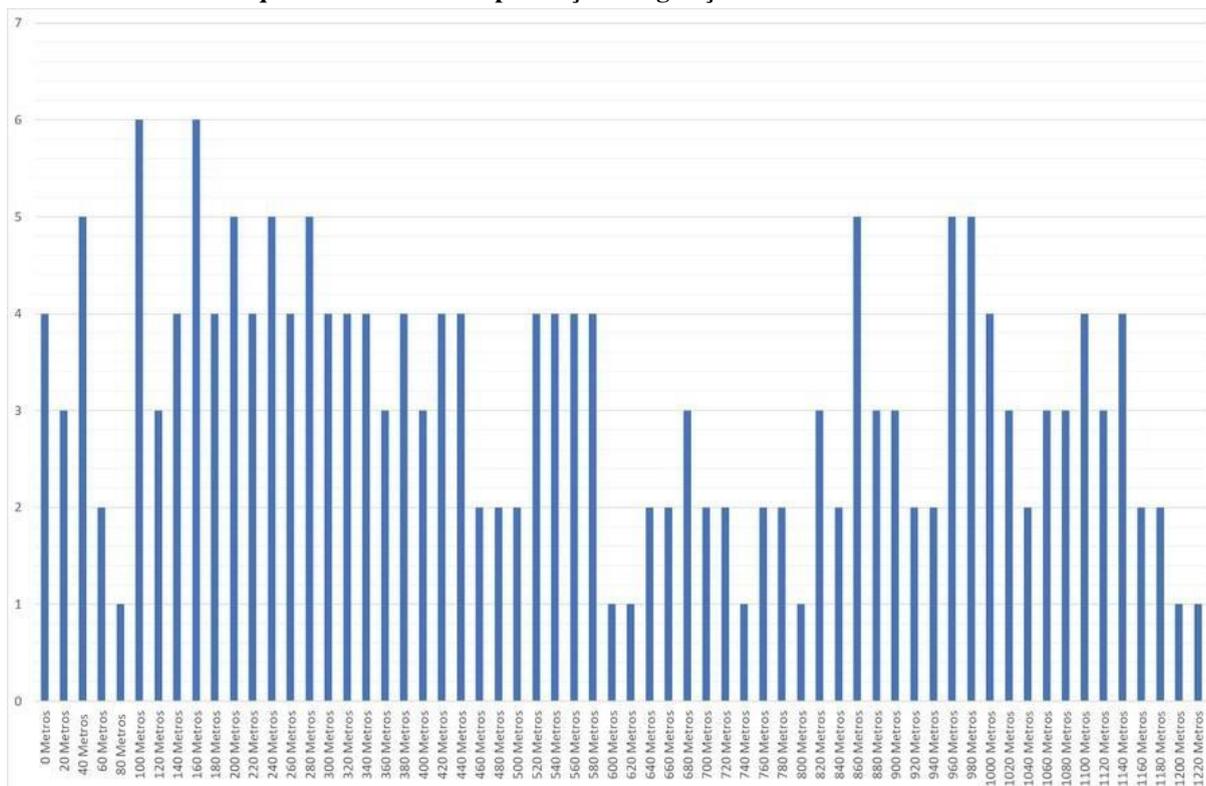
Gráfico 11 – Gráfico quantitativo da obstrução completa das sarjetas



Fonte: Autor.

O gráfico 12 mostra a baixa presença de vegetação entre as trincas e rachaduras da montante. Observa-se que os trechos de 100 e 160 metros registraram o maior número de baixa presença vegetal entre as trincas e rachaduras, com apenas 6 em cada. Por outro lado, o menor número, apenas 1, foi observado nos trechos 80, 600, 620, 740, 800, 1.200 e 1.220 metros.

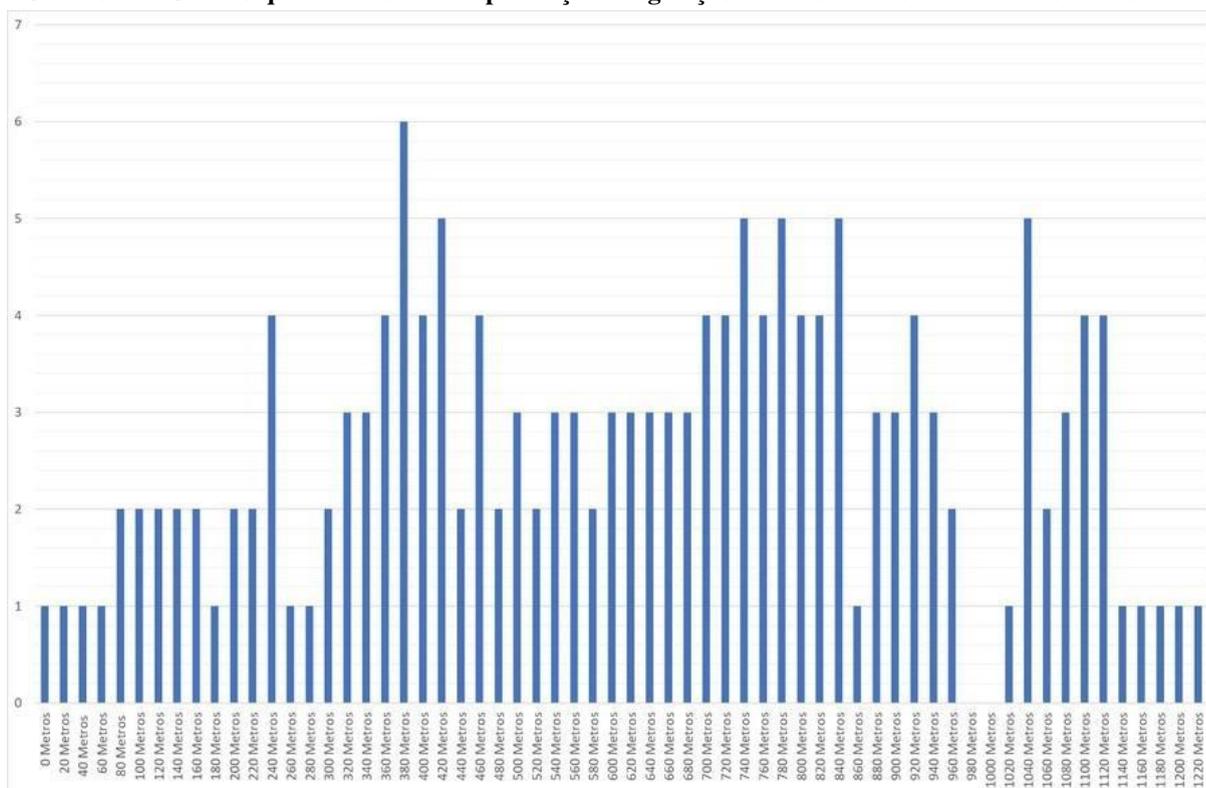
**Gráfico 12 – Gráfico quantitativo da baixa presença de vegetação entre as trincas e rachaduras da montante**



Fonte: Autor.

O gráfico 13 mostra a alta presença de vegetação entre as trincas e rachaduras da montante. Observa-se que o trecho de 380 metros registrou o maior número de ocorrências de alta presença vegetal nas trincas e rachaduras, com 6 cada. Por outro lado, os trechos de 980 e 1.000 metros não apresentaram nenhuma ocorrência de alta presença de vegetação.

Gráfico 13 – Gráfico quantitativo da alta presença de vegetação entre as trincas e rachaduras da montante



Fonte: Autor.

## 5 Conclusão

A aplicação da análise FMEA na avaliação dos riscos estruturais e ambientais na barragem dos reservatórios Coremas - Mãe D'água resultou na criação de um modelo que destaca os principais riscos estruturais e ambientais identificados ao longo da barragem. Isso possibilitou a análise e a classificação dos impactos gerados.

A avaliação dos riscos e dos pontos críticos de controle na barragem dos reservatórios revelou quatro áreas principais de preocupação: trincas e rachaduras, desgaste das juntas de concreto, obstrução das sarjetas e presença de vegetação na montante.

O elevado número de trincas nos trechos de 160m e 900m, assim como as rachaduras nos trechos de 420m e 1.040m, representam um risco significativo para a integridade estrutural, facilitando a infiltração de água e a degradação do concreto. O desgaste das juntas de concreto, observado parcialmente no trecho de 520m e completamente no trecho de 340m, causa a desunião das placas e aumenta o risco de falhas estruturais.

As causas desses riscos incluem flutuações térmicas, tensões estruturais, qualidade do concreto, movimentação diferencial, vibrações, intempéries, acúmulo de detritos e falta de controle adequado da vegetação. As consequências podem ser graves, como infiltração de água, colapso estrutural, falhas nas placas de concreto, erosão e instabilidade do solo.

Na classificação dos riscos, rachaduras e desgastes completos das juntas são considerados de alta gravidade, enquanto trincas e desgastes parciais são de média gravidade. Obstruções completas das sarjetas e alta presença de vegetação são riscos ambientais de alta gravidade, enquanto obstruções parciais e baixa de vegetação são de baixa gravidade.

Para prevenir esses problemas, estratégias específicas incluem a implementação de sistemas de monitoramento contínuo, aplicação de técnicas de reforço, inspeções regulares, programas de manutenção preventiva, uso de sistemas de drenagem eficazes e técnicas de bioengenharia para estabilização do solo.

Conclusivamente, através do monitoramento contínuo, manutenção preventiva e estratégias de controle eficazes, é possível mitigar os riscos identificados, garantindo a integridade e segurança da barragem, prolongando sua vida útil e protegendo o meio ambiente e as comunidades adjacentes.

## Referências

- AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS DO ESTADO DA PARAÍBA (AESAs). **Gestão das Águas**. 2023. Disponível em: <http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/documentos/gestao-das-aguas/>. Acesso em: 05 de Setembro de 2023.
- ANA. **Gestão da Água**. 2021. Disponível em: <https://relatorio-conjuntura-ana-2021.webflow.io/capitulos/gestao-da-agua>. Acesso em: 05/09/2023.
- ARAÚJO, J. M. de. **Análise de barragens de gravidade de concreto considerando a fase construtiva e a interação dinâmica barragem-reservatório-fundação**. 1995.
- BARBOSA, R. L. **Outorga hídrica sob a ótica da análise multicriterial. Estudo de caso: reservatório Coremas-Mãe d'Água-PB**. 2008.
- COLLE, G. de A. **Metodologias de análise de risco para classificação de barragens segundo a segurança**. 2008. 124 p. Dissertação (Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) — Universidade Federal do Paraná.
- DOMINGUES, R. M. **USO DO FMEA COMO FERRAMENTA PARA ANÁLISE DE RISCOS EM PROJETOS**. 2008. 60 p. Monografia (SISTEMAS DE INFORMAÇÃO) — UNIVERSIDADE FEDERA LDE SANTA CATARINA.
- ESPÓSITO, T. *et al.* Análise por árvore de eventos: ferramenta para gestão de risco em barragens de terra. **Geotecnia**, n. 120, p. 03 – 24, 2010.
- FONTENELLE, M. C. *et al.* Avaliações de risco em barragens: estudo de caso da barragem malcozinhado no nordeste brasileiro. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 14, n. 1, p. 25 – 42, Junho 2018.
- HARTFORD, D. N. D.; BAECHER, G. B. **Risk and uncertainty in dam safety**: CEA Technologies Dam Safety Interest Group. Londres: Thomas Telford Publishing, 2004. 391 p. ISBN 0-7277-3270-6.
- HE, J. *et al.* Emergency risk management for landslide dam breaks in 2018 on the Yangtze River, China. **Resilient Cities and Structures**, v. 1, n. 3, p. 1 – 11, 2022.
- LEITE, S. R. **Modelo para Avaliação de Riscos em Segurança de Barragens com Associação de Métodos de Análise de Decisão Multicritério e Conjuntos Fuzzy**. 2019. 222 p. Dissertação (COMPUTAÇÃO APLICADA) — UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA.
- LI, B. *et al.* Identification of failure modes and paths of reservoir dams under explosion loads. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 299, n. 108892, 2023.
- PERINI, D. S. **ESTUDO DOS PROCESSOS ENVOLVIDOS NA ANÁLISE DE RISCOS DE BARRAGENS DE TERRA**. 2009. 149 p. Dissertação (GEOTECNIA) — UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA.
- RODRIGUES, M. V. Ações para a qualidade: GEIQ, gestão integrada para a qualidade: padrão seis sigma, classe mundial. **Qualitymark**, Rio de Janeiro, 2004.
- SANTOS, E. P. D. **ANÁLISE TEMPORAL E HISTÓRICA DA DISTRIBUIÇÃO DOS RESERVATÓRIOS SUPERFICIAIS NO ESTADO DA PARAÍBA - BR**. 2018. 63 p. Monografia (GEOGRAFIA) — UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA.

SANTOS, R.; CALDEIRA, L.; SERRA, J. B. **Análise de Riscos pela FMEA. Aplicação ao Tapete Drenante de uma Barragem de Aterro.** 2006.

SELLA, B. C. **Comparativo entre as técnicas de análise de riscos APR e HAZOP.** 2014. 50 p. Monografia (Engenharia de Segurança do Trabalho) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

SILVA, E. L.; SILVA, M. A. Segurança de barragens e os riscos potenciais à saúde pública. *Saúde Debate*, RIO DE JANEIRO, v. 44, n. ESPECIAL 2, p. 242 – 261, JULHO 2020.

SOUSA, A. F. S. de. **Diretrizes para implantação de sistemas de reúso de água em condomínios residenciais baseadas no método APPCC-análise de perigos e pontos críticos de controle:** estudo de caso Residencial Valville I. 2008. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo.

VIANNA, L. F. V. **METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE RISCO APLICADAS EM PLANOS DE AÇÃO DE EMERGÊNCIA DE BARRAGENS: AUXÍLIO AO PROCESSO DE TOMADA DE DECISÃO.** 2015. 159 p. Dissertação (GEOTECNIA E TRANSPORTES) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. Acesso em: VIANNA, L. F. V.

YAMANE, A. K.; SOUZA, L. G. M. de. Aplicação do mapeamento de árvore de falhas (FTA) para melhoria contínua em uma empresa do setor automobilístico. In: **ENESEP XXVII-ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO.** [S.l.: s.n.], 2007.

## **Anexos**

Figura 19 – Quantitativo do número de falhas por trecho

Item	1		2		3		4		Σ
Modos de Falha	Integridade no concreto do talude		Desgaste nas juntas das placas de concreto		Obstrução das sarjetas na crista da parede		Vegetação presente na montante		
Falha	Presença de trincas no concreto do talude	Presença de rachadura no concreto do talude	Presença de desgaste parcial nas placas de concreto	Presença de desgaste completo nas placas de concreto	Obstrução parcial das sarjetas	Obstrução completa das sarjetas	Baixa presença de vegetação entre as trincas e rachaduras da montante	Alta presença de vegetação entre as trincas e rachaduras da montante	
0 Metros	2	1	3	3	1	0	4	1	15
20 Metros	4	4	3	1	1	0	3	1	17
40 Metros	0	2	3	3	0	0	5	1	14
60 Metros	3	0	3	1	0	0	2	1	10
80 Metros	1	2	3	1	0	0	1	2	10
100 Metros	3	2	2	3	0	0	6	2	18
120 Metros	2	2	2	2	0	1	3	2	14
140 Metros	2	2	1	3	0	0	4	2	14
160 Metros	8	3	4	1	0	0	6	2	24
180 Metros	1	2	2	3	0	0	4	1	13
200 Metros	2	2	1	4	0	0	5	2	16
220 Metros	3	2	4	1	0	0	4	2	16
240 Metros	2	2	3	4	0	0	5	4	20
260 Metros	4	1	2	2	0	0	4	1	14
280 Metros	2	2	3	3	0	0	5	1	16
300 Metros	3	2	3	2	0	1	4	2	17
320 Metros	6	1	1	3	0	0	4	3	18
340 Metros	5	2	2	6	0	0	4	3	22
360 Metros	4	3	1	3	0	0	3	4	18
380 Metros	3	4	2	4	0	0	4	6	23
400 Metros	5	3	2	2	1	0	3	4	20
420 Metros	2	5	2	5	0	0	4	5	23
440 Metros	3	1	2	3	0	0	4	2	15
460 Metros	4	1	2	4	0	0	2	4	17
480 Metros	4	1	1	2	0	0	2	2	12
500 Metros	5	2	4	2	0	0	2	3	18
520 Metros	4	1	6	1	0	0	4	2	18
540 Metros	4	1	4	2	0	0	4	3	18
560 Metros	5	3	2	2	0	0	4	3	19
580 Metros	7	3	3	3	0	0	4	2	22
600 Metros	3	2	3	2	0	0	1	3	14
620 Metros	7	1	0	4	0	0	1	3	16
640 Metros	2	1	2	3	0	0	2	3	13
660 Metros	6	3	1	1	0	0	2	3	16
680 Metros	5	2	2	3	0	0	3	3	18
700 Metros	4	3	1	2	0	0	2	4	16
720 Metros	4	2	2	4	0	0	2	4	18
740 Metros	3	3	1	4	0	0	1	5	17
760 Metros	5	2	2	3	0	0	2	4	18
780 Metros	2	3	1	3	0	0	2	5	16
800 Metros	2	3	0	2	0	0	1	4	12
820 Metros	2	4	2	3	0	0	3	4	18
840 Metros	4	4	0	3	0	0	2	5	18
860 Metros	5	2	2	4	0	0	5	1	19
880 Metros	4	2	2	4	0	0	3	3	18
900 Metros	8	1	1	4	0	0	3	3	20
920 Metros	5	2	3	3	0	0	2	4	19
940 Metros	6	2	2	5	0	0	2	3	20
960 Metros	5	2	3	3	0	1	5	2	21
980 Metros	5	0	5	2	1	0	5	0	18
1000 Metros	5	0	5	1	0	0	4	0	15
1020 Metros	5	0	4	2	0	0	3	1	15
1040 Metros	3	5	2	4	0	0	2	5	21
1060 Metros	6	0	3	4	0	0	3	2	18
1080 Metros	4	4	1	4	0	0	3	3	19
1100 Metros	5	3	3	4	0	0	4	4	23
1120 Metros	4	2	2	2	0	0	3	4	17
1140 Metros	7	4	2	2	0	0	4	1	20
1160 Metros	3	3	2	2	0	0	2	1	13
1180 Metros	4	3	1	1	0	0	2	1	12
1200 Metros	3	1	1	1	0	0	1	1	8
1220 Metros	3	4	1	0	0	1	1	1	11
Σ	242	135	138	168	4	4	194	163	

Fonte: Autor.

**Figura 20 – Trincas e rachaduras com alta presença de vegetação e desgastes das juntas de concreto no trecho 100 metros**



Fonte: Autor.

**Figura 21 – Sarjeta obstruída completamente no trecho de 120 metros**



Fonte: Autor.

**Figura 22 – Presença de trincas e rachaduras com baixa vegetação e desgaste parcial da junta de concreto no trecho de 280 metros**



Fonte: Autor.

**Figura 23 – Presença de rachadura com baixa vegetação e desgaste completo da junta de concreto no trecho de 300 metros**



Fonte: Autor.

**Figura 24 – Alta presença de vegetação com desgaste da junta de concreto e rachaduras presentes no trecho de 440 metros**



Fonte: Autor.

**Figura 25 – Trincas e desgaste parcial da junta de concreto no trecho de 560 metros**



Fonte: Autor.